

# **Eine Grundlegung der Average-Case Komplexitätstheorie**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Naturwissenschaften  
der Technischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes  
von

**Ingrid Biehl**

Saarbrücken  
1993

Tag des Kolloquiums: 3. Juni 1993  
Dekan: Prof. Dr. G. Hotz  
Berichterstatter: Prof. Dr. J. Buchmann  
Prof. Dr. K. Mehlhorn

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Buchmann herzlich dafür danken, daß ich an seinem Lehrstuhl diese Arbeit erstellen durfte. Er nahm sich stets die Zeit, meine Arbeit durch Ratschläge, Diskussionen und Verbesserungsvorschläge zu unterstützen.

Auch Herrn Professor Mehlhorn bin ich für sein Interesse an meiner Arbeit sehr dankbar.

Herr Professor Book hat durch seine Vorlesung über strukturelle Komplexitätstheorie im Wintersemester 1991 mein Interesse und mein Verständnis für die Theorie der Complexity Cores sehr gefördert. Ich danke ihm herzlich für sein Engagement und seine Hilfe.

Mein besonderer Dank gebührt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die mir die Arbeit an dieser Dissertation durch ein Stipendium im Graduiertenkolleg "Informatik" an der Universität des Saarlandes ermöglichte. Meinen Kollegen im Graduiertenkolleg danke ich für die gute kollegiale Atmosphäre in dieser Gruppe.

Besonders dankbar bin ich auch meiner Familie und meinem Freundeskreis. Meine Familie, insbesondere mein Ehemann, Volker Biehl, und meine Schwiegereltern, Eberhard und Brigitte Biehl, haben mich stets tatkräftig unterstützt. Meine lieben Freundinnen und Freunde Hellai Abdullah, Susanne Albers, Christiane und Andreas Dengel, Beate und Stephan Düllmann, Josef Gebel, Bärbel Müller, Volker Müller, Petra Naumann-Kipper, Bernhard Kipper, Gisela Pitsch und Ralf Roth hatten stets Zeit für Diskussionen und motivierende Gespräche.

Schließlich danke ich besonders herzlich meinen lieben Kollegen und Freunden Christian Thiel, Christoph Thiel und Bernd Meyer. Sie haben mir durch ihr Interesse an meiner Arbeit, durch ihre stete Bereitschaft zu Diskussionen, durch viele konstruktive Vorschläge und nicht zuletzt durch ihr sorgfältiges Korrekturlesen sehr geholfen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Einleitung . . . . .	5
1.2	Bezeichnungen . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Starke und schwache average-case Modelle</b>	<b>10</b>
2.1	Aufzählungen, Dichten und Verteilungen . . . . .	10
2.2	Das Levinsche Modell . . . . .	14
2.3	Starke average-case Modelle . . . . .	16
2.3.1	Definition der starken average-case Modelle . . . . .	18
2.3.2	Konstruktion starker average-case Modelle . . . . .	20
2.3.3	Positive Beispiele . . . . .	20
2.3.4	Negative Beispiele . . . . .	26
2.4	Schwache average-case Modelle . . . . .	28
2.4.1	Definition der schwachen average-case Modelle . . . . .	30
2.4.2	Konstruktion schwacher average-case Modelle . . . . .	30
2.4.3	Verhältnis zwischen starken und schwachen average-case Modellen . . . . .	32
2.4.4	Positive Beispiele . . . . .	33
2.4.5	Negative Beispiele . . . . .	45
2.5	Vergleichsmodelle unter Nicht-Standardaufzählungen . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Klassen von Dichten und Sprachklassen</b>	<b>47</b>
3.1	Dominanzbegriffe . . . . .	47
3.1.1	Funktionenweise Dominanz . . . . .	47
3.1.2	Dominanz bezüglich einer Menge von Funktionen . . . . .	47
3.1.3	Die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz . . . . .	51
3.2	Universelle Dichten . . . . .	52

3.3	P-abgeschlossene Funktionenmengen . . . . .	53
3.4	Stabile Funktionenmengen . . . . .	53
3.5	Das verwendete Turingmaschinen-Modell . . . . .	55
3.6	Klassen von Dichten und Verteilungen . . . . .	57
3.6.1	Berechenbare Dichten und Verteilungen . . . . .	57
3.6.2	Approximierbare Dichten und Verteilungen . . . . .	58
3.6.3	Generierbare Dichten und Verteilungen . . . . .	65
3.7	Sprachklassen . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Komplexitätstheorie</b>	<b>72</b>
4.1	Bekanntes aus der klassischen Komplexitätstheorie . . . . .	72
4.2	Hierarchiesätze . . . . .	74
4.2.1	Exkurs in die Theorie der Complexity Cores . . . . .	74
4.2.2	Ein Hierarchiesatz für $\mathbf{DTime}_\mu^R(T)$ . . . . .	77
4.2.3	Die Sprachklassen $\overline{\mathbf{DTime}_\mu^R(T)}$ . . . . .	80
4.2.4	Theorie der Super Complexity Cores . . . . .	81
4.2.5	Ein Hierarchiesatz für $\overline{\mathbf{DTime}_\mu^R(T)}$ . . . . .	97
4.3	Beziehungen zwischen Komplexitätsmaßen . . . . .	98
4.4	Der Satz von Savitch für schwache average-case Modelle . . . . .	100
4.5	Verhältnis zur worst-case Theorie . . . . .	107
<b>5</b>	<b>Vollständigkeitstheorie</b>	<b>111</b>
5.1	Polynomzeitreduktionen . . . . .	112
5.2	P-Transformationen . . . . .	114
5.3	Glatte schwache average-case Modelle . . . . .	119
5.4	Vollständigkeitsresultate . . . . .	121

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Einleitung

In der “klassischen” Komplexitätstheorie untersucht man, wie schwierig ein algorithmisches Problem im schwierigsten Fall (*worst-case*) ist. In der Praxis ist es aber unter Umständen wesentlich wichtiger zu wissen, wie aufwendig die Problemlösung *im Mittel* ist, d.h. zum Beispiel welche *mittlere* Laufzeit ein Lösungsalgorithmus hat, wenn die Eingaben einer bestimmten Verteilung unterliegen. Dies soll kurz an einem Beispiel erläutert werden.

Das Problem, zu erkennen, ob ein gegebener Graph *dreifärbbar* ist, d.h. ob eine Markierung der Knoten mit drei verschiedenen Farben existiert, so daß keine zwei durch eine Kante verbundenen Knoten die gleiche Farbe haben, wird *Dreifärbbarkeits-Problem* genannt. Es ist nicht bekannt, ob das Dreifärbbarkeits-Problem zur Klasse  $\mathcal{P}$  der in Polynomzeit entscheidbaren Probleme gehört. Für jede vorgeschlagene Färbung eines Graphen kann man aber in Polynomzeit entscheiden, ob sie eine korrekte Dreifärbung ist. Somit gehört das Dreifärbbarkeits-Problem zu  $\mathcal{NP}$ , der Klasse von Problemen, deren Lösungen sich in Polynomzeit verifizieren lassen. Es ist sogar  $\mathcal{NP}$ -vollständig (vergleiche [16]), d.h. falls  $\mathcal{P} \neq \mathcal{NP}$  gilt, gibt es keinen Lösungsalgorithmus für das Dreifärbbarkeits-Problem, dessen Laufzeit bei allen Eingaben polynomiell beschränkt ist. Die  $\mathcal{NP}$ -vollständigen Probleme gelten deshalb als besonders schwer. Allerdings bezieht sich diese Aussage nur auf die *worst-case* Situation. Es gibt nämlich Graphen, für die man in sehr kurzer Zeit entscheiden kann, ob sie dreifärbbar sind oder nicht. Je nachdem mit welcher Wahrscheinlichkeit “schwierige” und “einfache” Eingaben für einen Entscheidungsalgorithmus auftreten, ist die Problemlösung *im Mittel* mehr oder weniger aufwendig. H. S. Wilf gibt in [19] für eine bestimmte Verteilung auf den Eingabegraphen einen Algorithmus an, der das Dreifärbbarkeits-Problem löst und dessen erwartete Laufzeit *konstant* ist. Einen Überblick über eine Vielzahl solcher Resultate findet man in [10].

Selbst wenn  $\mathcal{P} \neq \mathcal{NP}$  gilt, könnte es dennoch zu jedem  $\mathcal{NP}$ -Problem und jeder in der “Praxis” auftretenden Verteilung einen Lösungsalgorithmus geben, dessen Laufzeit bei dieser Eingabeverteilung im Mittel polynomiell beschränkt ist.

Diese Beobachtungen lassen es sinnvoll erscheinen, eine *average-case Komplexitätstheorie* zu entwickeln. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines allgemeinen Rahmens für eine solche Theorie und die Herleitung einer Reihe möglichst allgemeiner Resultate innerhalb dieses Rahmens.

In der Literatur gibt es bereits einige Beiträge zu diesem Thema: Leonid A. Levin stellt 1984 in [11] eine Definition für den Begriff “im Mittel polynomielle Laufzeit” vor. In seinem Modell gelingt es Levin, eine Reduktionstheorie zu entwickeln und die Existenz eines vollständigen Problems nachzuweisen. Seit 1984 haben eine Reihe von Autoren die für die Levinsche Theorie entscheidende Definition von “im Mittel polynomielle Laufzeit” diskutiert. (Vergleiche dazu zum Beispiel [6], [1] und [8].) Es ist jedoch nicht klar, ob es weitere, sinnvolle Definitionen dieses Begriffes gibt, die von der Levinschen Definition verschieden sind. Daher regt O. Goldreich in [6] an, nach alternativen Definitionen zu suchen, die ebenso wie das Levinsche Modell zu einer an Ergebnissen reichen *average-case* Komplexitätstheorie führen.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit untersuchen wir die Frage, welche “natürlichen” Eigenschaften ein *average-case Modell* haben sollte. Ist in einem solchen Modell ein Algorithmus im Mittel polynomiell bezüglich einer bestimmten Eingabeverteilung, so verlangen wir zum Beispiel, daß dieser Algorithmus in dem Modell auch dann im Mittel polynomiell ist, wenn die Wahrscheinlichkeiten für die “leichten” Eingaben größer und entsprechend die Wahrscheinlichkeiten für die “schwierigen” Eingaben geringer werden. Modelle, die diese natürlichen Eigenschaften haben, heißen *starke average-case Modelle*. Wir zeigen, daß es Beispiele für solche Modelle gibt. Es stellt sich heraus, daß das Levinsche Modell kein starkes *average-case* Modell ist.

Im dritten Kapitel führen wir eine Reihe technischer Begriffe wie *Dominanz von Dichten* und *universelle Dichten* ein. Wir stellen verschiedene Klassen von Verteilungen vor und geben Beziehungen zwischen diesen Klassen an.

Wir zeigen im vierten Kapitel, daß wichtige aus der worst-case Komplexitätstheorie bekannte Zusammenhänge für alle schwachen *average-case* Modelle gelten. Zu diesen Resultaten gehören die Beziehungen zwischen *mittlerem Platz-* und *mittlerem Zeitbedarf* von deterministischen bzw. nichtdeterministischen Turingmaschinen, darunter zum Beispiel eine Übertragung des Satzes von Savitch auf allgemeine schwache *average-case* Modelle.

Während wir zum Beweis der genannten Resultate Techniken aus der klassischen Komplexitätstheorie verwenden können, führen diese beim Versuch, Hierarchiesätze für schwache *average-case* Modelle zu zeigen, nicht zum Ziel. Hierzu benötigen wir die Theorie der *Complexity Cores* (vergleiche [5]) bzw. die der *Super Complexity Cores*.

Ein Complexity Core für eine nicht in Polynomzeit entscheidbare Sprache  $L$  ist eine unendliche Menge von Strings, so daß jeder Lösungsalgorithmus für  $L$  mehr als polynomielle Laufzeit bei fast allen (d.h. allen bis auf endlich vielen) Eingaben aus dieser Menge benötigt. Bezüglich einer Verteilung, die die Elemente eines Complexity Cores für  $L$  besonders bevorzugt, haben daher alle Lösungsalgorithmen für  $L$  auch ein im Mittel schlechtes Laufzeitverhalten. Damit wird aber keine Aussage über die Laufzeit von Algorithmen gemacht, die die Sprachzugehörigkeit nur bei den

mit positiver Wahrscheinlichkeit auftretenden Eingaben korrekt berechnen. Wir entwickeln daher die Theorie der *Super Complexity Cores*. Ist  $S$  eine unendliche Menge von Strings und ist  $\mathcal{A}$  die Menge aller Algorithmen, die für alle Eingaben aus  $S$  die Sprachzugehörigkeit zu  $L$  korrekt entscheiden, dann ist  $S$  ein Super Complexity Core für  $L$ , wenn alle Algorithmen aus  $\mathcal{A}$  bei fast allen Eingaben aus  $S$  mehr als polynomielle Laufzeit verbrauchen. Treten nur Strings mit positiver Wahrscheinlichkeit auf, die Elemente eines solchen Super Complexity Cores sind, so hat jeder Algorithmus, der bei allen diesen Eingaben das korrekte Ergebnis liefert, eine im Mittel schlechte Laufzeit. Wir zeigen die Existenz von (rekursiven) Complexity Cores und die Existenz von (rekursiven) Super Complexity Cores und benutzen diese, um Hierarchiesätze in schwachen average-case Modellen zu beweisen.

Wir schließen das vierte Kapitel mit einem Satz über den Zusammenhang zwischen worst-case und average-case Komplexitätstheorie. Gemäß [1] gilt: Wenn sich im Levinschen Modell alle  $\mathcal{NP}$ -Sprachen in mittlerer polynomieller Zeit bezüglich aller in polynomieller Zeit approximierbaren Verteilungen auf den Eingaben erkennen lassen, so ergibt sich als Folgerung für die klassische Komplexitätstheorie, daß die Sprachklassen *DExpTime* und *NExpTime* identisch sind. Wir geben eine hinreichende Bedingung an, unter der für ein beliebiges schwaches average-case Modell ein entsprechender Satz gilt.

Im letzten Kapitel dieser Arbeit entwickeln wir eine Reduktions- und Vollständigkeitstheorie für schwache average-case Modelle. Der ursprünglich in der Levinschen Theorie entwickelte Begriff für "Polynomzeitreduktion" ist nicht "transitiv". (Vergleiche [6].) Wir geben eine allgemeine Definition für "Polynomzeitreduktion bezüglich eines schwachen average-case Modells" an, die die Transitivitätseigenschaft hat. Für einige schwache average-case Modelle geben wir hinreichende Bedingungen dafür an, daß eine Funktion eine Polynomzeitreduktion bezüglich dieses Modells ist. Schließlich verallgemeinern wir zwei im Levinschen Modell bekannte Vollständigkeitssätze (vergleiche [11] und [1]) auf eine spezielle Klasse von schwachen average-case Modellen und zeigen darüber hinaus weitere Vollständigkeitsresultate für diese Klasse.

## 1.2 Bezeichnungen

### Bezeichnung von Zahlbereichen

Wir verwenden folgende Symbole zur Bezeichnung von Zahlbereichen:

$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen (ohne Null)
$\mathbb{N}_0$	Menge der natürlichen Zahlen einschließlich Null
$\mathbb{Z}$	Menge der ganzen Zahlen
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$\mathbb{R}^+$	Menge der positiven reellen Zahlen (ohne Null)
$\mathbb{R}_0^+$	Menge der positiven reellen Zahlen einschließlich Null

Ist  $r \in \mathbb{R}$ , so bezeichnet  $\lfloor r \rfloor$  die größte ganze Zahl  $z$  mit  $z \leq r$ . Entsprechend bezeichnet  $\lceil r \rceil$  die kleinste ganze Zahl  $z$  mit  $r \leq z$ .

## Strings und Alphabete

Ist  $\Sigma$  ein *Alphabet*, d.h. eine endliche Menge, dann nennen wir eine endliche Folge  $\{x_i\}_{1 \leq i \leq k}$ ,  $k \in \mathbb{N}_0$ , von Elementen  $x_i$  aus  $\Sigma$  einen *String über  $\Sigma$*  oder auch ein *Wort über  $\Sigma$* . Wir benutzen für diesen String auch die Schreibweise  $x_1x_2 \dots x_k$ . Dabei ist die *Länge* des Strings  $x_1x_2 \dots x_k$  genau  $k$ . Ist  $x$  ein String über  $\Sigma$ , so wird mit  $|x|$  die Länge dieses Strings bezeichnet. Die leere Folge über  $\Sigma$  wird als der *leere String*  $\varepsilon$  bezeichnet. Dieser hat die Länge 0. Die Menge aller Strings über  $\Sigma$  der Länge  $n \in \mathbb{N}_0$  wird mit  $\Sigma^n$  bezeichnet. Darüber hinaus ist es üblich die Menge aller Strings über  $\Sigma$  als  $\Sigma^*$  zu schreiben, d.h. es gilt

$$\Sigma^* = \bigcup_{i \in \mathbb{N}_0} \Sigma^i.$$

Abkürzend schreibt man  $\Sigma^+$  für die Menge aller nicht-leeren String über  $\Sigma$ , somit ist

$$\Sigma^+ = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} \Sigma^i.$$

Sind  $k, \ell \in \mathbb{N}_0$ ,  $x = x_1 \dots x_k$  und  $y = y_1 \dots y_\ell$  Strings über  $\Sigma$ , dann bezeichnet die Schreibweise  $x \circ y$ , die *Konkatenation* der Strings  $x$  und  $y$ , d.h. den String  $x_1 \dots x_k y_1 \dots y_\ell$  der Länge  $k + \ell$  über  $\Sigma$ .

## Aufzählungen

Ist  $M$  eine abzählbare Menge und  $\{m_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine Folge von Elementen aus  $M$  mit

$$\bigcup_{i \in \mathbb{N}_0} \{m_i\} = M,$$

so nennen wir diese Folge eine *Aufzählung von  $M$* .

Gilt ferner für alle  $i, j \in \mathbb{N}_0$  mit  $i \neq j$

$$m_i \neq m_j,$$

so heißt die Folge  $\{m_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine *wiederholungsfreie Aufzählung von  $M$* .

## Die $\leq$ -Relation bei Funktionen

Sei  $M$  eine Menge mit einer totalen Ordnung  $\leq$  auf ihren Elementen, sei  $S \subseteq M$  und seien  $f, g : M \rightarrow \mathbb{R}$  Funktionen. Im folgenden verstehen wir unter der Schreibweise

$$f \leq_S g,$$

daß es  $m_1, m_2 \in S$  mit  $m_1 \leq m_2$  gibt, so daß für alle  $x \in S$  mit  $x > m_2$  oder  $x < m_1$  gilt:  $f(x) \leq g(x)$ . Ist die Menge  $S$  aus dem Kontext bekannt, so schreiben wir statt  $\leq_S$  auch kurz  $\leq$ . Entsprechendes gilt für die Schreibweisen  $<_S$  und  $<$ , sowie  $>_S$ ,  $>$ .

Ist  $S \subseteq \mathbb{R}$ , so bedeutet  $f \leq g$ , daß  $f(x) \leq g(x)$  für alle  $x \in S$  bis auf ein Intervall mit endlichen Intervallgrenzen gilt. Im Fall einer diskreten Menge  $S$  bedeutet  $f \leq_S g$ ,

daß  $f(x) \leq g(x)$  für alle bis auf endlich viele  $x \in S$  gilt. Wir sagen dann auch, daß  $f(x) \leq g(x)$  für fast alle  $x \in S$  gilt.

Ist  $\Sigma$  ein Alphabet,  $M = \Sigma^*$ , so ist zum Beispiel die lexikographische Ordnung auf den Strings über  $\Sigma$  eine totale Ordnung auf  $\Sigma^*$ . Ist  $S = \Sigma^*$  und sind  $f, g : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  Funktionen, so schreiben wir in dieser Arbeit in der Regel  $f \leq g$  statt  $f \leq_S g$  und entsprechend  $<$  statt  $<_S$ ,  $>$  statt  $>_S$ ,  $\geq$  statt  $\geq_S$  und  $\leq$  statt  $\leq_S$ .

### O-Notation

Sei  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  (bzw.  $f : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ ), so bezeichnen wir mit  $O(f)$  die Menge der Funktionen  $g : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  (bzw.  $g : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ ), für die es eine Konstante  $c > 0$  gibt, so daß für fast alle  $x \in \Sigma^*$

$$g(x) \leq c \cdot f(x)$$

gilt.

### Darstellung von Algorithmen

Wir verwenden zur Darstellung von Algorithmen eine modifizierte Form der von I. Nassi und B. Schneiderman in [15] eingeführten Struktogramme. Da diese selbst-erklärend sind, verzichten wir an dieser Stelle auf weitergehende Erläuterungen.

## Kapitel 2

# Starke und schwache average-case Modelle

### 2.1 Aufzählungen, Dichten und Verteilungen

Sei  $S$  eine unendliche abzählbare Menge und sei  $\phi : S \rightarrow \mathbb{N}_0$  eine Funktion. Ist  $\phi$  bijektiv, so ist die Folge  $\{x_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  mit  $\phi(x_i) = i$ ,  $i \in \mathbb{N}_0$ , eine wiederholungsfreie Aufzählung von  $S$ . Daher nennen wir  $\phi$  eine *wiederholungsfreie Aufzählungsfunktion von  $S$*  oder kurz auch eine *wiederholungsfreie Aufzählung von  $S$* .

Sei  $k \in \mathbb{N}_0$  und  $\Sigma = \{0, 1, 2, \dots, k\}$ . Dann ist  $\Sigma^*$  eine unendliche abzählbare Menge, denn es existiert zum Beispiel die folgende bijektive Abbildung  $\phi_\Sigma : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$ :

$$\begin{aligned}\phi_\Sigma(\varepsilon) &= 0, \\ \phi_\Sigma(x_1 x_2 \dots x_r) &= (k+1)^r + \sum_{i=1}^r (x_i + 1) \cdot (k+1)^{r-i} - 1\end{aligned}$$

mit  $x_1, x_2, \dots, x_r \in \{0, 1, \dots, k\}$ .

Wenn  $\phi$  eine wiederholungsfreie Aufzählung von  $\Sigma^*$  ist, wenn  $\phi$  in polynomieller Zeit in  $|x|$  bei Eingabe  $x \in \Sigma^*$  und  $\phi^{-1}$  in polynomieller Zeit in  $\log_2(n+1)$  bei Eingabe  $n \in \mathbb{N}_0$  berechnet werden kann, dann nennen wir  $\phi$  eine *lexikographische Aufzählung von  $S$* . Wir folgen mit dieser Begriffsbildung der in [6] üblichen Sprechweise.

Wie man leicht sieht, ist  $\phi_\Sigma$  eine lexikographische Aufzählung. Sie wird *Standardaufzählung von  $\Sigma^*$*  genannt.

Ist zum Beispiel  $\Sigma = \{0, 1\}$ , so ist

$$\begin{aligned}\phi_\Sigma(\varepsilon) &= 0, \\ \phi_\Sigma(0) &= 1, \\ \phi_\Sigma(1) &= 2, \\ \phi_\Sigma(00) &= 3, \\ &\dots \quad \cdot\end{aligned}$$

Sei  $\phi$  eine wiederholungsfreie Aufzählung von  $\Sigma^*$ ,  $x \in \Sigma^*$ ,  $k \in \mathbb{Z}$  mit  $\phi(x) + k \geq 0$ , so setzen wir

$$x \dot{+} k = \phi^{-1}(\phi(x) + k).$$

Hat  $x$  die Nummer  $n \in \mathbb{N}_0$  in der gegebenen wiederholungsfreien Aufzählung, so ist  $x \dot{+} k$  der String  $y$ , dessen Nummer gerade  $n + k$  ist. Wir schreiben  $x < y$ , wenn  $x$  in der gegebenen wiederholungsfreien Aufzählung eine kleinere Nummer als  $y$  hat. Entsprechend ist  $x \leq y$  zu verstehen.

Ist zum Beispiel  $\Sigma = \{0, 1\}$  und ist die Standardaufzählung gegeben, so ist

$$\text{“}00\text{”} \dot{+} (-1) = \text{“}1\text{”}$$

und

$$\text{“}0\text{”} \dot{+} 2 = \text{“}00\text{”}.$$

Hierbei haben wir Strings in  $\{0, 1\}^*$  durch “ und ” gekennzeichnet.

Hat man eine abzählbare Menge  $S$  und eine wiederholungsfreie Aufzählung  $\phi$  von  $S$  gegeben, so kann man die aus der Stochastik bekannten Begriffe der Dichte und Verteilung wie folgt definieren.

**Definition 2.1 (Verteilung, Dichte)**

1. Eine Funktion  $\psi : S \rightarrow [0, 1]$  heißt Dichte auf  $S$ , wenn

$$\sum_{y \in S} \psi(y) = 1$$

gilt.

Ist  $M \subseteq S$ , so setzen wir

$$\psi(M) = \sum_{x \in M} \psi(x).$$

Die Menge  $SUP(\psi) = \{x \in S : \psi(x) > 0\}$  heißt Trägermenge von  $\psi$ .

Ist  $|SUP(\psi)| = \infty$ , so heißt  $\psi$  unendlich, sonst endlich.

2. Sei  $\Psi : S \rightarrow [0, 1]$  eine Abbildung und  $\phi$  eine wiederholungsfreie Aufzählung von  $S$ . Ist die Funktion  $\Psi' : S \rightarrow [0, 1]$  mit

$$\Psi'(x) = \begin{cases} \Psi(x) - \Psi(\phi^{-1}(\phi(x) - 1)) & \text{falls } x \neq \varepsilon, \\ \Psi(x) & \text{falls } x = \varepsilon \end{cases}$$

eine Dichte auf  $S$ , so heißt  $\Psi$  Verteilung auf  $S$  bezüglich  $\phi$ . Die Funktion  $\Psi'$  heißt dann die zu  $\Psi$  bezüglich  $\phi$  gehörende Dichte.

Verteilungen sind bezüglich der zugrunde liegenden wiederholungsfreien Aufzählung monoton wachsend und konvergieren gegen 1, d.h.: Ist  $\Psi$  eine Verteilung auf  $S$  bezüglich  $\phi$ , ist  $\{x_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine Folge von Elementen aus  $S$  und gilt  $\phi(x_{i-1}) < \phi(x_i)$  für alle  $i \in \mathbb{N}$ , so folgt

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \Psi(x_i) = 1.$$

Zu einer gegebenen wiederholungsfreien Aufzählung  $\phi$  und einer Dichte  $\psi : S \rightarrow [0, 1]$  läßt sich eine Verteilung  $\psi^* : S \rightarrow [0, 1]$  mittels

$$\psi^*(x) = \sum_{\substack{y \in S \\ \phi(y) \leq \phi(x)}} \psi(y)$$

definieren. Es gilt:

$$(\psi^*)' = \psi.$$

Wir nennen  $\psi^*$  die zu  $\psi$  bezüglich  $\phi$  gehörende Verteilung.

In den folgenden Abschnitten und Kapiteln werden wir häufig statt einer Dichte auf  $S$  eine Funktion  $g : S \rightarrow [0, 1]$  angeben mit der Eigenschaft

$$0 < \sum_{x \in S} g(x) < \infty.$$

Die Konstante  $c = (\sum_{x \in S} g(x))^{-1}$  nennen wir *Normierungskonstante von  $g$* , denn mit

$$\mu(x) = c \cdot g(x)$$

ist eine Dichte gegeben.

Betrachten wir wieder den Fall, daß  $\Sigma = \{0, 1\}$  und  $S = \Sigma^*$  ist. Wir setzen

$$\mathcal{D} = \{\gamma : \gamma \text{ ist eine Dichte auf } \Sigma^*\}. \quad (2.1)$$

Sei  $\phi$  die Standardaufzählung von  $\Sigma$ . Dann ist zum Beispiel die Funktion

$$\mu_u : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$$

mit

$$\mu_u(x) = \begin{cases} \frac{6}{\pi^2} \cdot |x|^{-2} \cdot 2^{-|x|} & \text{falls } x \neq \varepsilon, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

eine Dichte auf  $\Sigma^*$ . Üblicherweise wird die zu  $\mu_u$  bezüglich der Standardaufzählung gehörende Verteilung in der Literatur als die *Gleichverteilung* auf  $\{0, 1\}^*$  bezeichnet. Alle Strings gleicher Länge haben die gleiche durch die Dichtefunktion gegebene Wahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Strings der Länge  $n$  ist gleich  $\frac{6}{\pi^2} \cdot n^{-2}$ . Dadurch wird eine Dichte auf den Längen der Strings, bzw. auf  $\mathbb{N}_0$  definiert, nämlich  $\gamma_{\mathbb{N}_0} : \mathbb{N}_0 \rightarrow [0, 1]$  mit

$$\gamma_{\mathbb{N}_0}(n) = \begin{cases} \frac{6}{\pi^2} \cdot n^{-2} & \text{falls } n \geq 1, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Strings  $x$  der Länge  $n$

$$\mu_n(x) = 2^{-n}.$$

Allgemeiner: Sei  $\Sigma$  ein beliebiges Alphabet und  $\phi$  eine lexikographische Aufzählung von  $\Sigma^*$ . Wir setzen

$$\begin{aligned} M_0^\phi &= \{x \in \Sigma^* : \phi(x) = 0\}, \\ M_n^\phi &= \{x \in \Sigma^* : |\Sigma|^n - 1 \leq \phi(x) < |\Sigma|^{n+1} - 1\} \end{aligned}$$

und  $\ell^\phi(x) = n$ , falls  $x \in M_n^\phi$ .

Ist  $\phi$  die Standardaufzählung, so ist  $M_n^\phi$  gerade die Menge aller Strings über  $\Sigma$  der Länge  $n$ , d.h.  $M_n^\phi = \Sigma^n$  und  $\ell^\phi(x) = |x|$ .

Seien  $\gamma_n : M_n^\phi \rightarrow [0, 1]$  für  $n \in \mathbb{N}_0$  und  $\gamma_{\mathbb{N}_0} : \mathbb{N}_0 \rightarrow [0, 1]$  Dichten. Sei  $x \in \Sigma^*$ , und sei  $n$  so gewählt, daß  $x \in M_n^\phi$  gilt. Dann wird mit

$$\gamma(x) = \gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \cdot \gamma_n(x)$$

eine Dichte auf  $\Sigma^*$  definiert, denn

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^*} \gamma(x) &= \sum_{n \in \mathbb{N}_0} \gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \cdot \sum_{x \in M_n^\phi} \gamma_n(x) \\ &= \sum_{n \in \mathbb{N}_0} \gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \cdot 1 \\ &= 1. \end{aligned}$$

Umgekehrt läßt sich zu jeder Dichte  $\gamma$  auf  $\Sigma^*$  eine Folge  $\gamma_{\mathbb{N}_0}, \gamma_0, \gamma_1, \dots$  obiger Form angeben, so daß für alle  $n \in \mathbb{N}_0$  und  $x \in M_n^\phi$  gilt:

$$\gamma(x) = \gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \cdot \gamma_n(x).$$

Dazu setzt man für  $n \in \mathbb{N}_0$

$$\gamma_{\mathbb{N}_0}(n) = \sum_{x \in M_n^\phi} \gamma(x)$$

und für  $x \in M_n^\phi$

$$\gamma_n(x) = \begin{cases} \frac{\gamma(x)}{\gamma_{\mathbb{N}_0}(n)} & \text{falls } \gamma_{\mathbb{N}_0}(n) > 0, \\ \frac{1}{|M_n^\phi|} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dabei wurde für den Fall  $\gamma_{\mathbb{N}_0}(n) = 0$  willkürlich die Gleichverteilung auf den Elementen von  $M_n^\phi$  gewählt. Man sieht leicht, daß diese Funktionen Dichten sind.

Wir nennen eine solche Folge von Dichten  $\gamma_{\mathbb{N}_0}, \gamma_0, \gamma_1, \dots$  eine *bezüglich  $\phi$  dekomponierte Dichte auf  $\Sigma^*$*  bzw. die *Dekomposition von  $\gamma$  bezüglich  $\phi$* . Umgekehrt heißt  $\gamma$  *Komposition* der Folge bezüglich  $\phi$ . Entsprechendes gilt für Verteilungen.

In den folgenden Abschnitten und Kapiteln gehen wir vom Alphabet  $\Sigma = \{0, 1\}$  und der zugehörigen Standardaufzählung aus, sofern wir nicht explizit andere Angaben machen.

## 2.2 Das Levinsche Modell

Ein in der Analyse von Algorithmen häufig untersuchtes Maß für die Güte eines Algorithmus ist seine *mittlere Laufzeit*, d.h. der Erwartungswert der Laufzeit bezüglich einer vorgegebenen Verteilung auf den Eingabestrings.

Genauer: Sei  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$  die Laufzeitfunktion einer Turingmaschine  $M$ , d.h.  $M$  macht an Eingabe  $x \in \Sigma^*$  genau  $f(x)$  Übergänge. Seien  $\gamma_n : \Sigma^n \rightarrow [0, 1]$ ,  $n \in \mathbb{N}_0$ , Dichten, so hat  $f$  *polynomiellen Erwartungswert bezüglich*  $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ , falls es ein  $t \in \mathbb{N}_0$  gibt, so daß für fast alle  $n \in \mathbb{N}_0$  gilt:

$$E_{\gamma_n}[f(X)] = \sum_{x \in \Sigma^n} f(x) \cdot \gamma_n(x) \leq n^t. \quad (2.2)$$

Auf der Suche nach einer formalen Definition für den Begriff “eine Funktion  $f$  ist im Mittel polynomiell bezüglich einer Verteilung  $\gamma : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$ ” bietet es sich zunächst an, zu fordern, daß  $f$  polynomiellen Erwartungswert bezüglich  $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  hat. O. Goldreich zeigt in [6], daß diese Formalisierung jedoch schwerwiegende Nachteile hätte.

Betrachtet man z.B. die Verteilung  $\gamma = \mu_u$  aus Abschnitt 2.1 und die Funktion

$$f(x) = \begin{cases} |x|^2 & \text{falls } x \neq 0 \dots 0, \\ 2^{|x|} & \text{falls } x = 0 \dots 0, \end{cases}$$

dann hat  $f$  polynomiellen Erwartungswert bezüglich  $\gamma$ , denn es gilt:

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^n} f(x) \cdot \gamma_n(x) &= n^2 \cdot (2^n - 1) \cdot 2^{-n} + 2^n \cdot 2^{-n} \\ &\leq n^2 + 1 \\ &\leq n^3 \end{aligned}$$

für  $n \geq 2$ . Es gilt aber auch

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^n} f^2(x) \cdot \gamma_n(x) &= n^4 \cdot (2^n - 1) \cdot 2^{-n} + 2^{2n} \cdot 2^{-n} \\ &\geq 2^n. \end{aligned}$$

Somit hat  $f^2$  keinen polynomiellen Erwartungswert bezüglich  $\gamma$ . Der Erwartungswert ist keine gute Formalisierung des Begriffs “im Mittel polynomiell”, wie wir im folgenden erläutern werden.

In der klassischen Komplexitätstheorie betrachtet man zum Beispiel Einband- und Zweiband-Turingmaschinen. Wird eine Sprache  $L$  von einer Zweiband-Turingmaschine in Zeit  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$  erkannt, so gibt es eine Einband-Turingmaschine, die  $L$  in Zeit  $O(f^2)$  erkennt. Damit ist sichergestellt, daß z.B. die Sprachklasse  $P$ , die Menge der Sprachen, die von einer deterministischen Turingmaschine in polynomieller Zeit erkannt werden können, nicht vom speziellen Turingmaschinen-Modell abhängt.

Um diese Unabhängigkeit vom speziellen Turingmaschinen-Modell auch für die Klasse der in “mittlerer Polynomzeit” erkennbaren Sprachen zu erhalten, muß eine Formalisierung des Begriffs “ $f$  ist im Mittel polynomiell” bezüglich einer gegebenen Verteilung  $\mu$  folgende Eigenschaft haben: Ist  $f$  im Mittel polynomiell bezüglich  $\mu$ , so folgt, daß auch  $f^k$  für alle  $k \in \mathbb{N}$  im Mittel polynomiell bezüglich  $\mu$  ist.

In [11] wurde 1984 von L. Levin die folgende Formalisierung vorgeschlagen:

**Definition 2.2** Eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  heißt im Mittel polynomiell (im Levinschen Modell) bezüglich einer Dichte  $\gamma : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$ , wenn es ein  $t \in \mathbb{N}$  gibt, so daß

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/t}}{|x|} < \infty$$

gilt.

Wie man leicht sieht, gilt im Levinschen Modell: Ist  $f$  im Mittel polynomiell bezüglich einer Dichte  $\gamma$  auf  $\Sigma^*$ , so ist für alle  $k \in \mathbb{N}_0$  die Funktion  $f^k$  ebenso im Mittel polynomiell bezüglich  $\gamma$ .

Weitere wichtige Eigenschaften der Levinschen Definition werden im folgenden Satz angegeben.

**Satz 2.3**

1. Ist  $f_1$  durch eine Funktion  $f_2$  beschränkt und ist  $f_2$  im Mittel polynomiell bezüglich einer Verteilung  $\gamma$ , so ist auch  $f_1$  im Mittel polynomiell bezüglich  $\gamma$ , d.h. es liegt eine Art Transitivität vor.
2. Ist  $f$  polynomiell beschränkt, so ist  $f$  auch im Mittel polynomiell bezüglich jeder Dichte  $\gamma$  auf  $\Sigma^*$ .
3. Sind  $f_1$  und  $f_2$  im Mittel polynomiell bezüglich einer Dichte  $\gamma$ , so ist auch  $f_1 + f_2$  im Mittel polynomiell bezüglich  $\gamma$ .
4. Ist  $f$  nicht polynomiell beschränkt, dann gibt es eine Verteilung  $\gamma$ , so daß  $f$  bezüglich  $\gamma$  nicht im Mittel polynomiell ist.

In Abschnitt 2.4.4 untersuchen wir die Eigenschaften des Levinschen Modells bzw. des dort eingeführten *erweiterten Levinschen Modells* genauer. Dort finden sich auch die Beweise zu den obigen Aussagen.

Von S. Ben-David u.a. wurde in Analogie zur Levinschen Definition in [1] der Begriff “im Mittel logarithmisch” eingeführt:

**Definition 2.4** Eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  heißt im Mittel logarithmisch (im Levinschen Modell) bezüglich einer Dichte  $\gamma : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$ , wenn es ein  $t \in \mathbb{N}$  gibt, so daß

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{2^{f(x)/t}}{|x|} < \infty$$

gilt.

Es läßt sich zeigen, daß folgendes gilt: Wenn eine Funktion  $f$  im Mittel logarithmisch bezüglich einer Verteilung  $\gamma$  ist, so ist  $2^f$  im Mittel polynomiell bezüglich  $\gamma$ . Dabei handelt es sich um eine wichtige Eigenschaft dieses Modells, da sie sicherstellt, daß alle Probleme, die in mittlerem logarithmischem Platz gelöst werden können, auch in mittlerer polynomieller Zeit gelöst werden können. Dies ist die analoge Aussage zu dem aus der klassischen Komplexitätstheorie bekannten Satz, daß alle Problem, die in Platz  $f$  gelöst werden können, auch in Zeit  $2^{k \cdot f}$  für ein  $k \in \mathbb{N}$  zu lösen sind. (Vergleiche dazu Korollar 2.2.17 in [12].) In Abschnitt 2.4.4 beweisen wir diese Behauptung in einem allgemeineren Zusammenhang.

### 2.3 Starke average-case Modelle

Nachdem das Levinsche Modell in [11] vorgestellt worden war, wurde in mehreren Veröffentlichungen gezeigt, daß es eine sinnvolle Formalisierung des Begriffs “im Mittel polynomiell” darstellt. Insbesondere gelang es, Reduktions- und Vollständigkeitsbegriffe einzuführen und vollständige Probleme nachzuweisen. Ein zentraler Punkt der Diskussion auf diesem Forschungsgebiet bleibt aber die Definition “im Mittel polynomiell” selbst. Wir untersuchen im folgenden, ob es alternative Formalisierungen dieses Begriffes gibt, die ebenso wie das Levinsche Modell zu starken Resultaten führen und intuitiv nachvollziehbare Eigenschaften haben. Im Levinschen Modell wird das Verhalten einer Funktion mit dem Verhalten aller Funktionen einer ganzen Funktionenklasse (den Polynomen) verglichen. Wir verfeinern die Fragestellung, indem wir nach solchen Formalisierungen suchen, in denen zwei Funktionen miteinander verglichen werden können.

Im folgenden benötigen wir die Menge der Funktionen

$$\mathcal{F} = \{f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{R}_0^+\}$$

und die in Gleichung (2.1) definierte Menge von Dichten  $\mathcal{D}$  auf  $\Sigma^*$ .

#### Definition 2.5 (Vergleichsmodell)

Ein Vergleichsmodell ist ein Paar  $R = (H, V)$  mit  $H \subseteq \mathcal{F}$  und  $V \subseteq \mathcal{F} \times \mathcal{D} \times H$ . Gilt  $(f, \gamma, g) \in V$ , so schreiben wir  $f \leq_\gamma^R g$ . Entsprechend schreiben wir  $f <_\gamma^R g$ , falls  $f \leq_\gamma^R g$  und  $g \not\leq_\gamma^R f$  gilt. Die Menge  $H$  heißt Menge der Vergleichsfunktionen von  $R$ .

In der klassischen Komplexitätstheorie vergleicht man Laufzeit- oder Speicherbedarfsfunktionen von Turingmaschinen in der Regel nur mit Funktionen wie den Polynomfunktionen, den Logarithmusfunktionen oder den Exponentialfunktionen. Deshalb beinhaltet die Definition des Begriffs Vergleichsmodell die Spezifikation der Menge der Vergleichsfunktionen  $H$  dieses Vergleichsmodells.

Im folgenden schreiben wir, wie in Abschnitt 1.2 bereits erwähnt, kurz

$$f \leq g$$

statt

$$f \leq_{\Sigma^*} g$$

für zwei Funktionen  $f, g \in \mathcal{F}$ , d.h. daß für fast alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:  $f(x) \leq g(x)$ .

**Definition 2.6**

1. Wir nennen eine Menge  $H \subseteq \mathcal{F}$  unbeschränkt, wenn es für alle  $f \in \mathcal{F}$  ein  $h \in H$  gibt, so daß

$$f \leq_{\Sigma^*} h$$

gilt. Andernfalls heißt  $H$  beschränkt.

2. Ein Vergleichsmodell  $R = (H, V)$  heißt unbeschränkt, wenn  $H$  unbeschränkt ist. Andernfalls heißt es beschränkt.

Man kann dem Levinschen Modell das (beschränkte) Vergleichsmodell  $L = (H, V)$  mit

$$H = \{|\cdot|^t : t \in \mathbb{N}\}$$

und

$$V = \left\{ (f, \gamma, |\cdot|^t) : \gamma \in \mathcal{D}, t \in \mathbb{N} \text{ und es gilt} \right. \\ \left. \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/t}}{|x|} < \infty \right\}$$

zuordnen. Dabei bezeichnen wir mit  $|\cdot|^t$  die Funktion, die  $x$  auf  $|x|^t$  abbildet.

Ebenso läßt sich aus der worst-case Komplexitätstheorie das Vergleichsmodell

$$\mathcal{W} = (\mathcal{F}, V)$$

mit

$$V = \{(f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und es gilt } f \leq g\}$$

entwickeln, bei der die dem Vergleich zugrunde liegende Dichte keine Rolle spielt.

Da im folgenden der Formel

$$f \leq_{\gamma}^R g$$

die Bedeutung “im durch  $R$  gegebenen Vergleichsmodell ist die Funktion  $f$  im Mittel bezüglich der Dichte  $\gamma$  nach oben durch die Funktion  $g$  beschränkt” gegeben werden soll, ist abzusehen, daß nicht jedes beliebige Vergleichsmodell für diese Interpretation sinnvolle Eigenschaften hat. Wir entwickeln daher in den folgenden Abschnitten solche Eigenschaften, die “sinnvolle” Vergleichsmodelle haben müssen, und geben Beispiele und Gegenbeispiele dafür an. Vergleichsmodelle, die diese Eigenschaften haben, werden wir *average-case Modelle* nennen.

Es stellt sich heraus, daß die in Abschnitt 2.3.1 vorgestellte erste Variante einiger dieser Eigenschaften so starke Forderungen an das Vergleichsmodell stellt, daß zum Beispiel das bewährte Levinsche Modell diesen nicht genügt. (Vergleiche Satz 2.19.)

Wir geben daher in Abschnitt 2.4 eine zweite schwächere Variante der entsprechenden Eigenschaften an. Wir zeigen, daß es eine Reihe von Vergleichsmodellen gibt, die diese schwächeren Eigenschaften haben. In Kapitel 3 zeigen wir dann, daß schon aus diesen schwachen Eigenschaften wichtige komplexitätstheoretische Zusammenhänge folgen.

### 2.3.1 Definition der starken average-case Modelle

Unser Ziel ist es, die Vergleichsmodelle  $R = (H, V)$  zu charakterisieren, für die die Relationen  $<_{\gamma}^R$  auf  $\mathcal{F} \times H$  für alle  $\gamma \in \mathcal{D}$  ähnliche Eigenschaften haben wie die oben definierte Relation  $<_{\Sigma^*}$  auf  $\mathcal{F} \times \mathcal{F}$ .

Wir werden im folgenden auf eine Reihe solcher Eigenschaften eingehen und ihre Bedeutung für eine sinnvolle average-case Theorie aufzeigen.

Wie wir schon in Abschnitt 2.2 gesehen haben, betrachten wir die Transitivität als eine wichtige Eigenschaft geeigneter Vergleichsmodelle. Ist ein Algorithmus  $A_1$  im Mittel bezüglich einer gegebenen Dichte  $\gamma$  mindestens so schnell wie ein Algorithmus  $A_2$  und ist dieser wiederum bezüglich  $\gamma$  mindestens so schnell wie ein Algorithmus  $A_3$ , so erwartet man unbedingt, daß  $A_1$  im Mittel bezüglich  $\gamma$  mindestens so schnell wie  $A_3$  ist. Diese Überlegung führt zur sogenannten *Transitivitätseigenschaft*.

Werden zwei verschiedene Algorithmen mit Laufzeiten  $f_1$  und  $f_2$  auf dieselbe Eingabe  $x$  angewandt, so daß sich die Gesamtlaufzeit als Summe der Einzellaufzeiten ergibt, so würde man erwarten, daß  $f_1 + f_2$  im Mittel bezüglich einer Verteilung  $\gamma$  kleiner oder gleich  $g_1 + g_2$  ist, sofern  $f_i$  im Mittel bezüglich  $\gamma$  kleiner oder gleich  $g_i$  für  $i = 1, 2$  ist. Ein Vergleichsmodell mit dieser Eigenschaft nennen wir *additiv monoton* oder *monoton bezüglich Addition*.

Es scheint uns natürlich zu sein, daß jedes geeignete Modell verträglich mit der gewöhnlichen Ordnungsrelation ist. Dabei sind nur  $x \in \text{SUP}(\gamma)$  von Interesse. Folgt aus  $f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g$ , daß  $f \leq_{\gamma}^R g$  gilt, so sagen wir,  $R$  ist *verträglich mit  $\leq$* .

Umgekehrt würde man auch erwarten, daß  $f \not\leq_{\gamma}^R g$  für eine unendliche Dichte  $\gamma$  gilt, falls  $g <_{\text{SUP}(\gamma)} f$  ist. Diese Idee spiegelt sich in der *starken Antisymmetrieeigenschaft* wider. Ein weiterer Grund, daß wir von einem "sinnvollen" Vergleichsmodell eine Art Antisymmetrieeigenschaft fordern, besteht darin, daß wir in Satz 2.18 zeigen, daß auch das triviale Vergleichsmodell  $\mathcal{W} = (\mathcal{F}, \mathcal{F} \times \mathcal{D} \times \mathcal{F})$  die anderen Eigenschaften hat. Diese Relation würde man intuitiv nicht für ein vernünftiges Vergleichsmodell halten.

Wie bereits erwähnt, halten wir es für notwendig, daß auch in den im folgenden betrachteten Modellen für eine average-case Komplexitätstheorie Invarianz bezüglich des zugrunde gelegten Turingmaschinen-Modells gewahrt bleibt. Daher nennen wir ein Vergleichsmodell  $R$  *monoton bezüglich Komposition*, wenn aus  $f \leq_{\gamma}^R g$  für ausgewählte Funktionen  $t : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  auch  $t \circ f \leq_{\gamma}^R t \circ g$  folgt. Selbstverständlich macht es keinen Sinn, dies für alle Funktionen aus der Menge

$$\mathcal{NF} = \{t : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+\}$$

zu fordern: Ist zum Beispiel  $f < g$  und  $t$  eine streng monoton fallende Funktion, so ist sicher  $t \circ g < t \circ f$  und demnach würde  $t \circ f \leq_{\gamma}^R t \circ g$  zu einem Widerspruch zur Antisymmetrie führen. Bei unseren Untersuchungen hat sich gezeigt, daß es sich anbietet, diese Kompositionseigenschaft für Funktionen  $t$  aus

$$\mathcal{MW} = \{t \in \mathcal{NF} : t \text{ ist streng monoton wachsend und konvex} \}$$

zu fordern. Man beachte dabei, daß jede Funktion  $t \in \mathcal{MW}$  stetig ist.

Als letzte Eigenschaft eines geeigneten Vergleichsmodells  $R$  fordern wir, daß das Vergleichsmodell *monoton bezüglich Verbesserung der Verteilung* ist: Weiß man, daß  $f \leq_{\gamma}^R g$  gilt und daß die Verteilung  $\tau$  die Instanzen  $x$  mit  $f(x) \leq g(x)$  wenigstens so stark bevorzugt wie  $\gamma$ , d.h.  $\tau(x) \geq \gamma(x)$ , und die Instanzen  $x$  mit  $f(x) > g(x)$  höchstens so stark gewichtet wie  $\gamma$ , d.h.  $\tau(x) \leq \gamma(x)$ , so würde man sicher erwarten, daß  $f \leq_{\tau}^R g$  gilt. Wir führen für eine derartige Situation zwischen  $\gamma$  und  $\tau$  bei gegebenen  $f$  und  $g$  folgende Schreibweise ein:

**Definition 2.7** Gegeben  $f, g \in \mathcal{F}$  und  $\tau, \gamma \in \mathcal{D}$ , so schreiben wir

$$\tau \leq_{(f,g)} \gamma,$$

wenn  $\tau(x) \leq \gamma(x)$  für fast alle  $x \in \Sigma^*$  mit  $f(x) > g(x)$  gilt, und wenn ferner  $\tau(x) \geq \gamma(x)$  für fast alle  $x \in \Sigma^*$  mit  $f(x) \leq g(x)$  gilt.

Die oben erläuterten Eigenschaften werden im folgenden formalisiert:

**Definition 2.8** Sei  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell.

1. Wir sagen,  $R$  ist

- (ST) stark transitiv, wenn für alle  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g, h \in H$  aus  $f \leq_{\gamma}^R g, g \leq_{\gamma}^R h$  folgt, daß auch  $f \leq_{\gamma}^R h$  gilt.
- (SMA) stark monoton bezüglich Addition, wenn für  $f_1, f_2 \in \mathcal{F}$  und  $g_1, g_2 \in H$  aus  $f_1 \leq_{\gamma}^R g_1, f_2 \leq_{\gamma}^R g_2$  folgt, daß auch  $f_1 + f_2 \leq_{\gamma}^R g_1 + g_2$  gilt.
- (MK) monoton bezüglich Komposition, wenn für alle  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g \in H$  und  $t \in \mathcal{MW}$  aus  $f \leq_{\gamma}^R g$  folgt, daß  $t \circ f \leq_{\gamma}^R t \circ g$  gilt.
- (V) verträglich mit  $\leq$ , wenn für alle Dichten  $\gamma \in \mathcal{D}$  und für alle Funktionen  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g \in H$  aus  $f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g$  folgt, daß  $f \leq_{\gamma}^R g$  gilt.
- (MV) monoton bezüglich Verbesserung der Verteilung, wenn für alle  $f \in \mathcal{F}$  und  $g \in H$  mit  $f \leq_{\gamma}^R g$  gilt: Ist  $\tau$  eine Dichte mit  $\tau \leq_{(f,g)} \gamma$ , so gilt  $f \leq_{\tau}^R g$ .
- (SA) stark antisymmetrisch, wenn für alle  $\gamma \in \mathcal{D}$  mit  $|\text{SUP}(\gamma)| = \infty$  und für alle  $g \in H$  und  $f \in \mathcal{F}$  aus  $g <_{\text{SUP}(\gamma)} f$  folgt, daß  $f \not\leq_{\gamma}^R g$  gilt.

2. Wenn  $R$  unbeschränkt ist und alle obigen Eigenschaften hat, sagen wir,  $R$  ist ein starkes average-case Modell.

**Lemma 2.9** *Ist ein Vergleichsmodell  $R$  verträglich mit  $\leq$  und stark transitiv, so gilt für alle  $f, g \in \mathcal{F}$  mit  $f \not\leq_\gamma^R g$  und alle  $h \in H$  mit  $g \geq h$ :*

$$f \not\leq_\gamma^R h.$$

**Beweis:** Falls  $f \leq_\gamma^R h$  und  $g \geq h$  gilt, so folgt mit den Eigenschaften (V) und (ST), daß  $f \leq_\gamma^R g$  gilt, im Widerspruch zur Voraussetzung. ■

### 2.3.2 Konstruktion starker average-case Modelle

Ist  $S$  eine Menge von Vergleichsmodellen, so wird mittels  $R = (H, V)$  mit

$$H = \bigcap_{(H', V') \in S} H'$$

und

$$V = \{(f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } R' \in S \text{ gilt } f \leq_\gamma^{R'} g\}$$

ein neues Vergleichsmodell definiert. Man sieht leicht, daß folgender Satz gilt:

#### Satz 2.10

1. *Wenn alle  $R' \in S$  eine der Eigenschaften  $\{(ST), (SMA), (MK), (MV), (V), (SA)\}$  haben, dann hat auch  $R$  diese Eigenschaft.*
2. *Wenn ein  $R' \in S$  ein starkes average-case Modell ist, alle  $R' \in S$  die Eigenschaften  $(ST), (SMA), (MK), (MV)$  und  $(V)$  haben und  $H$  unbeschränkt ist, dann ist  $R$  ein starkes average-case Modell.*

### 2.3.3 Positive Beispiele

Sind  $R_1 = (H_1, V_1)$  und  $R_2 = (H_2, V_2)$  zwei Vergleichsmodelle, so nennen wir  $R_1$  eine *Erweiterung* von  $R_2$ , wenn  $H_2 \subseteq H_1$  und  $V_2 \subseteq V_1$  gilt. Umgekehrt nennen wir  $R_2$  eine *Einschränkung* von  $R_1$ .

Wir zeigen, daß jedes starke average-case Modell  $R = (H, V)$  mit  $H = \mathcal{F}$  eine Erweiterung der folgenden Abwandlung des Modells der worst-case Komplexitätstheorie ist.

**Satz 2.11** *Das Vergleichsmodell  $\mathcal{FU} = (\mathcal{F}, V)$  mit*

$$V = \{(f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D}, f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g\}$$

*ist ein starkes average-case Modell.*

**Beweis:** Nach Definition ist  $\mathcal{FU}$  unbeschränkt.

1. (ST): Seien  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} g, g \leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} h$ , dann gibt es in der Menge  $SUP(\gamma)$  nur endlich viele  $x$  mit  $f(x) > g(x)$  oder  $g(x) > h(x)$ . Somit gibt es in  $SUP(\gamma)$  auch nur endlich viele  $x$  mit  $f(x) > h(x)$ . Daraus folgt aber  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} h$ , und es ergibt sich, daß  $\mathcal{FU}$  stark transitiv ist.
2. (SMA): Die starke additive Monotonie beweist man analog zur starken Transitivität.
3. (MK): Seien  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} g$ , und sei  $t : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  streng monoton wachsend. Da  $f(x) > g(x)$  nur für endlich viele  $x \in SUP(\gamma)$  gilt und da  $t$  streng monoton wachsend ist, gilt auch nur an diesen endlich vielen Stellen  $t(f(x)) > t(g(x))$ . Also ist  $t \circ f \leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} t \circ g$ .
4. (MV): Sei  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} g$ . Gibt es nur endlich viele  $x \in SUP(\gamma)$  mit  $f(x) > g(x)$  und ist  $\tau \leq_{(f,g)} \gamma$ , so gibt es auch nur endlich viele  $x \in SUP(\tau)$  mit  $f(x) > g(x)$ . Daher ist  $f \leq_{\tau}^{\mathcal{FU}} g$ .
5. (V): Die Verträglichkeitseigenschaft liegt nach Definition vor.
6. (SA): Gilt  $g <_{SUP(\gamma)} f$  und ist  $\gamma$  unendlich, so gilt  $f \not\leq_{SUP(\gamma)} g$ . Daraus folgt  $f \not\leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} g$ .

Es folgt, daß  $\mathcal{FU}$  ein starkes average-case Modell ist. ■

Offensichtlich gilt der folgende Satz:

**Satz 2.12** Jedes Vergleichsmodell  $R = (H, V)$  mit  $H = \mathcal{F}$ , das verträglich mit  $\leq$  ist, ist eine Erweiterung von  $\mathcal{FU}$ .

**Korollar 2.13** Jedes starke average-case Modell  $R = (H, V)$  mit  $H = \mathcal{F}$  ist eine Erweiterung von  $\mathcal{FU}$ .

**Beweis:** Jedes starke average-case Modell  $R$  ist verträglich mit  $\leq$ . Somit gilt für alle  $\gamma$  und alle  $f, g \in \mathcal{F}$  mit  $f \leq_{SUP(\gamma)} g$  die Beziehung  $f \leq_{\gamma}^R g$  gilt. Damit folgt die Behauptung. ■

Wir untersuchen nun Beispiele, bei denen im Gegensatz zu den bis jetzt beschriebenen Vergleichsmodellen die Größe der Werte  $\gamma(x)$  eine Rolle spielt.

Wir führen folgende Notation ein: Sei  $\gamma$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$ . Mit  $s_{\gamma} : \mathbb{N}_0 \rightarrow \{0, 1\}$  bezeichnen wir die Funktion

$$s_{\gamma}(n) = \begin{cases} 0 & \text{falls } n \notin SUP(\gamma), \\ 1 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Ist  $\gamma$  eine Dichte auf  $\Sigma^*$  und  $\gamma_{\mathbb{N}_0}$  die zugehörige Dichte auf  $\mathbb{N}_0$ , so schreiben wir abkürzend statt  $s_{\gamma_{\mathbb{N}_0}}$  auch  $s_{\gamma}$ .

**Satz 2.14** Sei  $w : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  eine Funktion, und sei  $R = (\mathcal{F}, V)$  ein Vergleichsmodell mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D}, \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) \right) = 0 \right\}.$$

Dann ist  $R$  ein starkes average-case Modell.

**Beweis:** Nach Definition ist  $R$  unbeschränkt.

Wir zeigen, daß die Eigenschaften eines starken average-case Modells vorliegen.

1. (ST): Seien  $f \leq_\gamma^R g, g \leq_\gamma^R h$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma(x) \right) &= 0, \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ g(x) > h(x)}} \gamma(x) \right) &= 0. \end{aligned}$$

Wenn  $f(x) > h(x)$  gilt, folgt  $f(x) > g(x)$  oder  $g(x) > h(x)$ . Deshalb folgt

$$\begin{aligned} &\lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > h(x)}} \gamma(x) \right) \\ &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \left( \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma(x) + \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ g(x) > h(x)}} \gamma(x) \right) \right) \\ &= 0. \end{aligned}$$

Somit folgt  $f \leq_\gamma^R h$ .

2. (SMA): Analog zu (ST) beweist man, daß  $R$  stark monoton bezüglich Addition ist.
3. (MK): Ist  $t \in \mathcal{MW}$ , so gilt für fast alle  $x \in \Sigma^*$ , daß aus  $t(f(x)) > t(g(x))$  die Ungleichung  $f(x) > g(x)$  folgt. Daraus ergibt sich leicht die Eigenschaft (MK).
4. (V): Ist  $\gamma \in \mathcal{D}$  und  $f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g$ , dann ist

$$\left\{ s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) \right\}_{n \in \mathbb{N}_0}$$

eine Folge, die nur an endlich vielen Stellen positive Werte annimmt. Somit konvergiert sie gegen 0. Damit gilt

$$f \leq_{\gamma}^R g.$$

5. (MV): Sei  $f \leq_{\gamma}^R g$  und  $\tau$  eine Dichte mit  $\tau \leq_{(f,g)} \gamma$ . Sei für  $n \in \mathbb{N}_0$

$$B_n = \{x \in \Sigma^n : f(x) > g(x)\}.$$

Wir zeigen zunächst, daß für fast alle  $n \in \mathbb{N}$

$$s_{\tau}(n) \cdot \tau_n(B_n) \leq s_{\gamma}(n) \cdot \gamma_n(B_n) \quad (2.3)$$

gilt.

Ist  $\tau_n(B_n) = 0$ , so ist die obige Ungleichung trivialerweise erfüllt. Nach Definition 2.7 gibt es ein  $N \geq 0$ , so daß für alle  $n \geq N$  folgendes gilt: Falls  $\tau_n(B_n) > 0$  gilt, ist auch  $\gamma_n(B_n) > 0$ . Damit ist

$$s_{\tau}(n) = s_{\gamma}(n) = 1,$$

und es gilt

$$\begin{aligned} \tau(B_n) &\leq \gamma(B_n), \\ \tau(\Sigma^n \setminus B_n) &\geq \gamma(\Sigma^n \setminus B_n), \\ \gamma_n(B_n) &= \frac{\gamma(B_n)}{\gamma(B_n) + \gamma(\Sigma^n \setminus B_n)}, \\ \tau_n(B_n) &= \frac{\tau(B_n)}{\tau(B_n) + \tau(\Sigma^n \setminus B_n)}. \end{aligned}$$

Daher ist

$$\tau(B_n) \cdot \gamma(\Sigma^n \setminus B_n) \leq \gamma(B_n) \cdot \tau(\Sigma^n \setminus B_n).$$

Somit folgt durch Addition von  $\tau(B_n) \cdot \gamma(B_n)$  auf beiden Seiten der Ungleichung

$$\tau(B_n) \cdot (\gamma(B_n) + \gamma(\Sigma^n \setminus B_n)) \leq \gamma(B_n) \cdot (\tau(B_n) + \tau(\Sigma^n \setminus B_n)).$$

Also gilt für alle  $n \geq N$  mit  $\tau(B_n) > 0$

$$\tau_n(B_n) \leq \gamma_n(B_n).$$

Da  $s_{\tau}(n) = s_{\gamma}(n) = 1$  gilt, folgt, daß die Ungleichung (2.3) erfüllt ist.

Mittels der Ungleichung (2.3) erhält man für fast alle  $n \in \mathbb{N}_0$

$$\begin{aligned} &s_{\tau}(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \tau_n(x) \\ &= s_{\tau}(n) \cdot w(n) \cdot \tau_n(B_n) \\ &\leq s_{\gamma}(n) \cdot w(n) \cdot \gamma_n(B_n) \\ &= s_{\gamma}(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x). \end{aligned}$$

Somit folgt die Eigenschaft (V).

6. (SA): Sei  $\gamma \in \mathcal{D}$  eine unendliche Dichte. Seien  $f, g \in \mathcal{F}$  mit  $g <_{\text{SUP}(\gamma)} f$ , dann ist für fast alle  $n \in \mathbb{N}$

$$s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) = s_\gamma(n) \cdot w(n).$$

Somit ist

$$\left\{ s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) \right\}_{n \in \mathbb{N}}$$

keine Nullfolge. Daraus folgt nach Definition

$$f \not\prec_\gamma^R g.$$

■

Aus Satz 2.14 und Satz 2.10 ergibt sich die folgende Aussage:

**Satz 2.15** Sei  $S$  eine Menge von Funktionen  $w : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}$ . Dann ist  $R = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } w \in S \text{ gilt} \right. \\ \left. \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot w(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) \right) = 0 \right\}$$

ein starkes average-case Modell.

Aus diesem Satz läßt sich folgendes Beispiel für ein starkes average-case Modell ableiten:

Als *PolySum1-Modell* bezeichnen wir Vergleichsmodell  $\mathcal{MS} = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } t \in \mathbb{N} \text{ gilt} \right. \\ \left. \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot n^t \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) \right) = 0 \right\}.$$

**Korollar 2.16** Das Vergleichsmodell  $\mathcal{MS}$  ist ein starkes average-case Modell.

Ein weiteres Beispiel wird in dem nachstehenden Satz vorgestellt:

**Satz 2.17** Das Vergleichsmodell  $\mathcal{Z} = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und es gilt} \right. \\ \left. \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_\gamma(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) \right) = 0 \right\}$$

ist ein starkes average-case Modell.

Der Wert

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x)$$

in der obigen Formel ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß  $f(x) > g(x)$  gilt, wenn  $x$  gemäß der Dichte  $\gamma_n$  aus  $\Sigma^n$  zufällig gewählt wird. Im Vergleichsmodell  $\mathcal{Z}$  gilt  $f \leq_{\mathcal{Z}}^{\gamma} g$  genau dann, wenn diese Wahrscheinlichkeit asymptotisch gegen Null strebt. Dabei sind nur Eingabelängen  $n$  relevant, für die

$$\gamma(\Sigma^n) > 0$$

gilt, d.h. für die es Eingaben  $x$  mit  $|x| = n$  und  $\gamma(x) > 0$  gibt. Deshalb wird das asymptotische Verhalten der Folge

$$\left\{ s_\gamma(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > g(x)}} \gamma_n(x) \right\}_{n \in \mathbb{N}_0}$$

untersucht, die nur dann positive Werte annimmt, wenn  $s_\gamma(n) > 0$  und somit  $\gamma(\Sigma^n) > 0$  gilt.

### Weitere positive Beispiele

Weitere Beispiele für starke average-case Modelle sind alle Vergleichsmodelle der Form  $R = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } w \in S \text{ gilt} \right. \\ \left. \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} s_\gamma(|x|) \cdot w(|x|) \cdot \gamma_{|x|}(x) < \infty \right\},$$

wobei  $S$  eine Menge von Funktionen  $w : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}$  ist.

Ein Beispiel dieser Art ist  $\mathcal{SR} = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } t \in \mathbb{N} \text{ gilt} \right. \\ \left. \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} s_\gamma(|x|) \cdot |x|^t \cdot \gamma_{|x|}(x) < \infty \right\}.$$

Da die Beweise dieser Aussagen die gleichen Beweistechniken verwenden, die in den Beweisen der analogen Aussagen bei anderen Modellen auftreten, verzichten wir hier auf die Beweise.

### 2.3.4 Negative Beispiele

In Abschnitt 2.4.4 geben wir positive Beispiele für sogenannte schwache average-case Modelle an. Diese Beispiele sind keine starken average-case Modelle, wie in Abschnitt 2.4.4 gezeigt wird. Darüber hinaus sind auch alle Vergleichsmodelle, die keine schwachen average-case Modelle sind (siehe Abschnitt 2.4.5), keine starken average-case Modelle, wie wir in Abschnitt 2.4.3 zeigen. In diesem Abschnitt beschränken wir uns daher auf drei Beispiele.

Wie man leicht sieht, gilt der folgende Satz:

**Satz 2.18** *Das Vergleichsmodell  $\mathcal{W} = (\mathcal{F}, \mathcal{F} \times \mathcal{D} \times \mathcal{F})$  hat die Eigenschaften (ST), (SMA), (MK), (MV), (V), aber nicht (SA). Somit ist  $\mathcal{W}$  kein starkes average-case Modell.*

Als weiteres Beispiel untersuchen wir das Vergleichsmodell  $R = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \{(f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } n \in \mathbb{N} \text{ gilt} \\ f(0^n) \leq g(0^n) \text{ oder } \gamma(0^n) = 0\}.$$

Hier spielen nur die Instanzen  $x$  eine Rolle, die ausschließlich aus Nullen bestehen. Sei zum Beispiel  $f(x) = 2^{|x|}$  und  $g(x) = 1$ , das heißt,  $g$  ist die Funktion, die konstant den Wert 1 annimmt, sei weiter  $\gamma$  beliebig, nehme aber an allen  $x \in \{0\}^*$  den Wert 0 an. Dann gilt nach obiger Definition  $f \leq_\gamma^R g$ . Also ist  $R$  nicht stark antisymmetrisch. Das entspricht auch der Intuition, da die Funktion  $f$  im obigen Beispiel an allen Stellen erheblich größer als  $g$  ist und die Dichte  $\gamma$  aus einer großen Menge von Dichten frei gewählt werden kann.

Wir zeigen nun, daß das Levinsche Modell einige Eigenschaften eines starken average-case Modells nicht hat. Daher werden wir im nächsten Abschnitt diese abschwächen, um in unserer Theorie auch dieses Modell mit zu umfassen.

**Satz 2.19** *Das Levinsche Modell ist weder stark transitiv noch stark antisymmetrisch.*

**Beweis:** Wir zeigen zunächst, daß  $L$  nicht stark transitiv ist. Sei  $f(x) = |x|^{12}$ ,  $g(x) = |x|^4$  und  $h(x) = |x|^3$ , und sei

$$\gamma(x) = c \cdot 2^{-|x|} \cdot |x|^{-3} (1 + \log_2 |x|)^{-2},$$

wobei  $c$  die Normierungskonstante ist. Dann gilt  $f \leq_{\gamma}^L g$  und  $g \leq_{\gamma}^L h$ , denn

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/4}}{|x|} &= c \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} 2^{-|x|} \cdot |x|^{-3} \cdot (1 + \log_2 |x|)^{-2} \cdot |x|^2 \\ &= c \cdot \sum_{n \in \mathbb{N}} n^{-1} \cdot (1 + \log_2 n)^{-2} \\ &< \infty \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{g(x)^{1/3}}{|x|} &= c \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} 2^{-|x|} \cdot |x|^{-3} \cdot (1 + \log_2 |x|)^{-2} \cdot |x|^{1/3} \\ &= c \cdot \sum_{n \in \mathbb{N}} n^{-8/3} \cdot (1 + \log_2 n)^{-2} \\ &< \infty. \end{aligned}$$

Aber  $f \not\leq_{\gamma}^L h$ , denn

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/3}}{|x|} &= c \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} 2^{-|x|} \cdot |x|^{-3} \cdot (1 + \log_2 |x|)^{-2} \cdot |x|^3 \\ &= c \cdot \sum_{n \in \mathbb{N}} (1 + \log_2 n)^{-2} \\ &= \infty. \end{aligned}$$

Das Levinsche Modell ist auch nicht stark antisymmetrisch. Um dies zu sehen, betrachte man  $f(x) = |x|^3$ ,  $g(x) = |x|^2$  und

$$\gamma(x) = \begin{cases} c \cdot \frac{1}{|x|^{2 \cdot 2^{|x|}}} & \text{falls } x \neq \varepsilon, \\ 0 & \text{falls } x = \varepsilon, \end{cases}$$

wobei  $c \in \mathbb{R}^+$  die Normierungskonstante ist.

Dann gilt

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/2}}{|x|} &= \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot |x|^{1/2} \\ &= \sum_{x \in \Sigma^+} \frac{c}{|x|^{3/2} \cdot 2^{|x|}} \\ &< \infty. \end{aligned}$$

Daraus folgt, daß  $f \leq_{\gamma}^L g$ . Da aber  $g < f$  gilt und  $|\text{SUP}(\gamma)| = \infty$ , ist somit  $L$  nicht stark antisymmetrisch. Daraus folgt die Behauptung. ■

In der klassischen Komplexitätstheorie beschäftigt man sich in der Regel mit Komplexitätsklassen wie  $P$ ,  $EXPTIME$  u.ä. Der Anspruch der Levinschen Definition besteht nur darin, festzulegen, ob eine Funktion im Mittel polynomiell ist oder nicht. Daher ist es nicht verwunderlich, daß für Polynomfunktionen keine starke Antisymmetrie vorliegt. Ist dagegen zum Beispiel  $g(x) = |x|$ ,  $f(x) = 2^{|x|}$  und  $\gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \geq \frac{1}{n^t}$  für ein  $t > 1$ , so sieht man leicht, daß  $f \not\leq_{\gamma}^L g$ , d.h. in Fällen, in denen  $f$  “erheblich” von  $g$  abweicht und  $\gamma_{\mathbb{N}_0}$  nicht “zu schnell” mit wachsendem  $n$  fällt, können  $f$  und  $g$  sehr wohl im Levinschen Modell unterschieden werden.

## 2.4 Schwache average-case Modelle

Wir schwächen nun die Forderungen an ein Vergleichsmodell derart ab, daß sich auch das Levinsche Modell verallgemeinern und in die Theorie der *schwachen average-case Modelle* einordnen läßt.

Wie wir im Beweis von Satz 2.19 gezeigt haben, gibt es Beispiele für Vergleichsmodelle  $R = (H, V)$ , die nicht stark antisymmetrisch sind. Genauer: Es gibt unendliche Dichten  $\mu$  und Funktionen  $f, g$ , so daß  $g < f$ , aber  $f \leq_{\mu}^R g$  gilt.

Möglicherweise ist die starke Antisymmetrieeigenschaft eine zu restriktive Forderung an ein average-case Modell. Daher möchten wir die Antisymmetriebedingung abschwächen. Eine erste Abschwächung besteht darin, daß wir nicht mehr fordern, daß aus  $g <_{SUP(\gamma)} f$  folgt, daß  $f \not\leq_{\gamma}^R g$  gilt, sondern nur noch verlangen, daß zu jedem  $g$  ein  $f \in H$  mit  $f > g$  existiert, so daß für alle unendlichen Dichten  $\gamma$  gilt:  $f \not\leq_{\gamma}^R g$ . Somit soll für Funktionenpaare  $f, g \in \mathcal{F}$  derart, daß  $g$  “sehr viel” kleiner als  $f$  ist, und für unendliche Dichten  $\gamma$  die Beziehung  $f \not\leq_{\gamma}^R g$  gelten. Dabei ist das Vergleichsmodell  $R$  dafür maßgeblich, wie “sehr” definiert ist.

Betrachtet man zwei verschiedene unendliche Dichten  $\gamma$  und  $\tau$ , wobei für fast alle  $n \in \mathbb{N}_0$  die Ungleichungen  $\gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \geq \frac{1}{n^3}$  und  $\tau_{\mathbb{N}_0}(n) \geq \frac{1}{2^n}$  gelten, so fällt die “Bedeutung”, d.h. die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Eingaben mit steigender Stringlänge, bei  $\gamma$  wesentlich langsamer als bei  $\tau$ . Bei  $\tau$  liegt die “Masse” der Wahrscheinlichkeit stärker bei Eingaben kleiner Länge als bei  $\gamma$ . Anders ausgedrückt:  $\tau$  ist einer endlichen Verteilung näher verwandt als  $\gamma$ . Wir ordnen daher die Dichten  $\mu$  gemäß dem Verhalten von  $\mu_{\mathbb{N}_0}$ .

**Definition 2.20** Sei  $\omega : \mathbb{N}_0 \rightarrow [0, 1]$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$ . Wir bezeichnen mit  $\mathcal{D}_{\omega}$  die Menge aller unendlichen Dichten  $\gamma \in \mathcal{D}$  mit folgenden Eigenschaften:

1.  $SUP(\gamma_{\mathbb{N}_0}) \subseteq SUP(\omega)$ .
2. Es gilt  $\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ s_{\gamma}(n)=1}} \frac{\omega(n)}{\gamma_{\mathbb{N}_0}(n)} < \infty$ .

Ist  $\omega$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$  und ist  $\gamma \in \mathcal{D}_{\omega}$ , so bedeutet dies, daß unter der Dichte  $\gamma$  die Wahrscheinlichkeiten für zunehmende Eingabelängen weniger schnell fallen als die Funktion  $\omega$ .

**Definition 2.21** Ist  $\Omega$  eine Menge von Dichten auf  $\mathbb{N}_0$ , so setzen wir

$$\mathcal{D}_\Omega = \bigcup_{\omega \in \Omega} \mathcal{D}_\omega.$$

Seien  $f, g \in \mathcal{F}$ . In der Levinschen Definition wird ein Zusammenhang hergestellt zwischen der Wahrscheinlichkeit, mit der ein  $x$  mit  $f(x) > g(x)$  auftritt, und der Größe der Abweichung des Wertes  $f(x)$  vom Wert  $g(x)$ . Gibt es zu viele dieser Abweichungen, in denen entweder die Größe der Abweichung oder die Wahrscheinlichkeit für die Abweichungsstelle groß ist, so gilt  $f \not\leq_\gamma^L g$ .

Gegeben eine Funktion  $g$  und gegeben eine Dichte  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$ , so findet man stets eine Funktion  $f$ , so daß im Levinschen Modell  $f \not\leq_\gamma^L g$  für alle  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$  gilt. Wir zeigen diese Aussage in Korollar 2.34. Man sieht leicht, daß die Funktion  $f$  um so schneller wachsen muß, je schneller  $\omega$  fällt.

**Definition 2.22** Sei  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell und  $\omega$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$ .

1. Sei  $g \in H$  und  $f \in \mathcal{F}$ . Gilt  $f > g$  und gilt für alle  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$ , daß

$$f \not\leq_\gamma^R g,$$

so sagen wir, daß  $f$  die Funktion  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert.

2. Gibt es zu allen  $g \in H$  ein  $f \in \mathcal{F}$ , das  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert, so heißt  $R$  schwach antisymmetrisch bezüglich  $\omega$ .
3. Wir bezeichnen mit  $\Omega_R$  die Menge aller Dichten  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$ , so daß  $R$  schwach antisymmetrisch bezüglich  $\omega$  ist.

Eine sinnvolle schwache Antisymmetrieforderung könnte darin bestehen, daß man von einem Vergleichsmodell  $R$  verlangt, daß  $\Omega_R$  die Menge aller Dichten auf  $\mathbb{N}_0$  ist. Bei unseren Untersuchungen hat sich jedoch gezeigt, daß es günstig ist, die Antisymmetrieforderung noch schwächer zu fassen. Zum Beispiel gilt für das PolySum2-Modell, das wir in Abschnitt 2.4.4 vorstellen werden, daß  $\Omega_R$  nicht alle Dichten auf  $\mathbb{N}_0$  enthält, obwohl dieses Modell ansonsten "sinnvolle" Eigenschaften hat.

Wir verlangen von einem Vergleichsmodell  $R$ , das schwach antisymmetrisch ist, lediglich, daß  $\Omega_R \neq \emptyset$  gilt. Dies wird im folgenden Abschnitt formalisiert.

Darüber hinaus geben wir eine schwache Form der Transitivität, die auch vom Levinschen Modell erfüllt wird, und eine schwache Form der Monotonie bezüglich Addition an, die in weiteren Modellen, die wir hier nicht untersuchen werden, wichtig ist.

### 2.4.1 Definition der schwachen average-case Modelle

**Definition 2.23** Sei  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell.

1. Wir sagen,  $R$  ist

(WT) schwach transitiv, wenn

i. für alle  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g, h \in H$  aus  $f \leq_\gamma^R g$  und  $g \leq h$  folgt, daß  $f \leq_\gamma^R h$  gilt, und

ii. für alle  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g, h \in H$  aus  $f \leq_{SUP(\gamma)} g$  und  $g \leq_\gamma^R h$  folgt, daß  $f \leq_\gamma^R h$  gilt.

(WMA) schwach monoton bezüglich Addition, wenn es ein  $c \geq 1$  gibt, so daß für alle  $f_1, f_2 \in \mathcal{F}$ ,  $g_1, g_2 \in H$  aus  $f_1 \leq_\gamma^R g_1$ ,  $f_2 \leq_\gamma^R g_2$  folgt, daß

$$f_1 + f_2 \leq_\gamma^R c \cdot (g_1 + g_2)$$

gilt. Die kleinste Konstante  $c$  mit dieser Eigenschaft bezeichnen wir mit  $c_R$ .

(WA) schwach antisymmetrisch, wenn  $\Omega_R \neq \emptyset$ .

2. Ein Vergleichsmodell  $R$ , das die Eigenschaften (WT), (WMA), (MK), (MV), (V) und (WA) hat, heißt schwaches average-case Modell.

Für schwache average-case Modelle gilt das folgende Lemma:

**Lemma 2.24** Sei  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell, das verträglich mit  $\leq$  und schwach transitiv ist. Seien  $\omega$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$ ,  $g \in H$  und  $h \in \mathcal{F}$ , so daß  $h$  die Funktion  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert. Dann gilt für alle  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$  und alle  $f \in \mathcal{F}$  mit  $h \leq_{SUP(\gamma)} f$

$$f \not\leq_\gamma^R g.$$

**Beweis:** Falls  $f \leq_\gamma^R g$  für ein  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$  gilt, folgt aus der zweiten Eigenschaft der schwachen Transitivität

$$h \leq_\gamma^R g$$

im Widerspruch dazu, daß  $h$  die Funktion  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert. Daraus folgt die Behauptung. ■

### 2.4.2 Konstruktion schwacher average-case Modelle

Sei  $S$  eine Menge von Vergleichsmodellen, und sei  $R = (H, V)$  mit

$$H = \bigcap_{(H', V') \in S} H'$$

und

$$V = \{(f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D}, g \in H \text{ und für alle } R' \in S \text{ gilt } f \leq_\gamma^{R'} g\}.$$

Man sieht leicht, daß folgender Satz gilt:

**Satz 2.25**

1. Seien  $g \in H$ ,  $f \in \mathcal{F}$  und  $\omega$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$ . Wenn es ein  $R' \in S$  gibt, so daß  $f$  die Funktion  $g$  bezüglich  $R'$  und  $\omega$  dominiert, so gilt:  $f$  dominiert  $g$  auch bezüglich  $R$  und  $\omega$ .

2. Es gilt:

$$\bigcup_{R' \in S} \Omega_{R'} \subseteq \Omega_R.$$

3. Wenn alle  $R' \in S$  eine Eigenschaft aus der Menge  $\{(ST), (WT), (SMA), (WMA), (MK), (MV), (V), (SA), (WA)\}$  haben, dann hat auch  $R$  diese Eigenschaft.

4. Wenn ein  $R' \in S$  ein schwaches average-case Modell ist, alle  $R' \in S$  die Eigenschaften  $(WT)$ ,  $(WMA)$ ,  $(MK)$ ,  $(MV)$  und  $(V)$  haben und  $H$  unbeschränkt ist, dann ist  $R$  ein schwaches average-case Modell.

**Beweis:**

1. Ist  $f > g$  und gilt für alle  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$

$$f \not\leq_\gamma^{R'} g,$$

so folgt

$$f \not\leq_\gamma^R g.$$

Daraus folgt die Behauptung.

2. Sei  $\omega \in \bigcup_{R' \in S} \Omega_{R'}$ , dann gibt es ein  $R' \in S$ , so daß für jedes  $g \in H'$  ein  $f \in \mathcal{F}$  existiert mit: Für alle  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$  gilt

$$f \leq_\gamma^{R'} g.$$

Insbesondere gibt es daher für jedes  $g \in H$  ein  $f \in \mathcal{F}$  mit

$$f \leq_\gamma^{R'} g.$$

Damit gilt auch

$$f \leq_\gamma^R g.$$

3. Folgt aus der Definition von  $R$ .

4. Diese Aussage folgt aus den zuvor gezeigten Zusammenhängen. ■

### 2.4.3 Verhältnis zwischen starken und schwachen average-case Modellen

Wie wir schon angedeutet haben, gilt der folgende Satz:

**Satz 2.26** *Jedes starke average-case Modell  $R$  ist auch ein schwaches average-case Modell.*

**Beweis:** Sei  $R = (H, V)$  ein starkes average-case Modell. Es genügt zu zeigen, daß die Eigenschaften (WMA), (WT) und (WA) aus den Eigenschaften eines starken average-case Modells folgen.

1. Transitivität:

(a) Seien  $f \in \mathcal{F}, g, h \in H$  mit  $f \leq_\gamma^R g$  und  $g \leq h$ . Da  $R$  verträglich mit  $\leq$  ist, gilt

$$g \leq_\gamma^R h.$$

Da  $R$  stark transitiv ist, folgt somit

$$f \leq_\gamma^R h.$$

(b) Ist  $f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g$ , dann ist  $f \leq_\gamma^R g$  gemäß der Verträglichkeitseigenschaft. Ist  $g \leq_\gamma^R h$ , dann folgt

$$f \leq_\gamma^R h,$$

da  $R$  stark transitiv ist.

2. Monotonie bezüglich Addition: Aus der starken Monotonie bezüglich Addition folgt direkt die schwache Monotonie bezüglich Addition mit Konstante  $c_R = 1$ .

6. Antisymmetrie: Sei  $g \in H$  beliebig. Zu  $g + 1$  gibt es ein  $g' \in H$  mit  $g + 1 \leq g'$ , da  $R$  unbeschränkt ist. Aus der Eigenschaft der starken Antisymmetrie folgt für alle unendlichen Dichten  $\mu \in \mathcal{D}$ , daß

$$g' \not\leq_\mu^R g.$$

Daraus folgt, daß  $\Omega_R$  die Menge aller Dichten auf  $\mathbb{N}_0$  ist. ■

Wir schließen diesen Abschnitt mit folgenden Satz, der aus Satz 2.12 direkt gefolgert werden kann:

**Satz 2.27** *Jedes schwache average-case Modell  $R = (H, V)$  mit  $H = \mathcal{F}$  ist eine Erweiterung von  $\mathcal{FU}$ .*

### 2.4.4 Positive Beispiele

In diesem Abschnitt geben wir eine Erweiterung des Levinschen Modells an, die ein schwaches average-case Modell ist. Darüber hinaus zeigen wir, daß es weitere Beispiele für schwache average-case Modelle gibt.

#### Das erweiterte Levinsche Modell

Wir führen zunächst einige Begriffe ein:

**Definition 2.28** Eine Funktion  $f \in \mathcal{F}$  heißt längenwachsend, wenn sie die folgenden Bedingungen erfüllt:

1.  $f$  ist nach oben nicht beschränkt.
2. Für alle  $x, y \in \Sigma^*$  mit  $|x| = |y|$  gilt  $f(x) = f(y)$ .
3. Für alle  $x, y \in \Sigma^*$  mit  $|x| < |y|$  gilt  $f(x) < f(y)$ .

Wie man leicht sieht, gilt folgendes Lemma:

**Lemma 2.29** Seien  $f, g \in \mathcal{F}$ ,  $c \in \mathbb{R}^+$  und  $t \in \mathcal{MW}$ . Sind  $f$  und  $g$  längenwachsend, so sind auch  $c \cdot f$ ,  $f + g$ ,  $\max\{f, g\}$ ,  $\min\{f, g\}$ ,  $f \cdot g$  und  $t \circ f$  längenwachsend.

Ist  $f$  eine längenwachsende Funktion, so bezeichnen wir mit  $\hat{f}: \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  die Funktion, die durch lineare Interpolation zwischen den Stützstellen  $(n, f(0^n))$  entsteht, wobei mit  $0^0$  der leere String  $\varepsilon$  bezeichnet wird, d.h.

$$\hat{f}(r) = (1 - r + \lfloor r \rfloor) \cdot f(0^{\lfloor r \rfloor}) + (r - \lfloor r \rfloor) \cdot f(0^{\lfloor r \rfloor + 1}). \quad (2.4)$$

Da  $f$  längenwachsend ist, ist  $\hat{f}$  streng monoton wachsend auf  $\mathbb{R}_0^+$  und

$$\hat{f}(\mathbb{R}_0^+) = [f(\varepsilon), \infty[ \subseteq \mathbb{R}.$$

Sei  $\hat{f}^{-1}$  die inverse Funktion zu  $f$  auf  $[f(\varepsilon), \infty[$ . Wir erweitern  $\hat{f}^{-1}$  auf  $\mathbb{R}_0^+$ , indem wir für  $r < f(\varepsilon)$

$$\hat{f}^{-1}(r) = 0$$

setzen. Somit ist  $\hat{f}^{-1}$  monoton wachsend.

#### Lemma 2.30

1. Sind  $g$  und  $h$  längenwachsend und gilt ferner  $g \leq h$ , so ist  $\hat{h}^{-1} \leq \hat{g}^{-1}$ .
2. Sind  $g_1$  und  $g_2$  längenwachsend, dann ist für alle  $r \in \mathbb{R}_0^+$

$$g_1 \widehat{+} g_2(r) = \hat{g}_1(r) + \hat{g}_2(r). \quad (2.5)$$

3. Sind  $g_1, g_2$  langenwachsend, dann gilt fur alle  $r \in \mathbb{R}_0^+$  und alle  $\lambda \in [0, 1]$  mit  $r \in (g_1 \widehat{+} g_2)(\mathbb{R}_0^+)$ ,  $\lambda \cdot r \in \widehat{g}_1(\mathbb{R}_0^+)$  und  $(1 - \lambda) \cdot r \in \widehat{g}_2(\mathbb{R}_0^+)$ , die folgende Ungleichung

$$g_1 \widehat{+} g_2^{-1}(r) \leq \widehat{g}_1^{-1}(\lambda \cdot r) + \widehat{g}_2^{-1}((1 - \lambda) \cdot r).$$

4. Ist  $t \in \mathcal{MW}$  und ist  $g$  langenwachsend, so ist

$$t \circ g \geq t \circ \widehat{g}.$$

**Beweis:**

1. Sei  $N = \max\{n \in \mathbb{N} : \widehat{g}(n) > \widehat{h}(n)\}$ . Fur alle  $r \geq N + 1$  gilt dann  $\widehat{g}(r) \leq \widehat{h}(r)$ . Entsprechend gilt fur alle  $z \in \mathbb{R}$  mit  $z \geq \widehat{h}(N + 1)$ , daß

$$\widehat{h}^{-1}(z) \leq \widehat{g}^{-1}(z).$$

2. Nach Definition ist fur alle  $n \in \mathbb{N}_0$

$$g_1 \widehat{+} g_2(n) = (g_1 + g_2)(0^n) = g_1(0^n) + g_2(0^n) = \widehat{g}_1(n) + \widehat{g}_2(n).$$

Daher folgt fur alle  $r \in \mathbb{R}_0^+$

$$\begin{aligned} g_1 \widehat{+} g_2(r) &= (1 - r + \lfloor r \rfloor) \cdot g_1 \widehat{+} g_2(\lfloor r \rfloor) + (r - \lfloor r \rfloor) \cdot g_1 \widehat{+} g_2(\lfloor r \rfloor + 1) \\ &= (1 - r + \lfloor r \rfloor) \cdot (\widehat{g}_1 + \widehat{g}_2)(\lfloor r \rfloor) + (r - \lfloor r \rfloor) \cdot (\widehat{g}_1 + \widehat{g}_2)(\lfloor r \rfloor + 1) \\ &= \widehat{g}_1(r) + \widehat{g}_2(r). \end{aligned}$$

3. Vorausgesetzt  $g_1, g_2$  sind langenwachsend und es gibt  $r \in \mathbb{R}_0^+$  und  $\lambda \in [0, 1]$ , so daß die Argumente in der folgenden Ungleichung in den entsprechenden Definitionsbereichen enthalten sind. Gilt

$$(g_1 \widehat{+} g_2)^{-1}(r) > \widehat{g}_1^{-1}(\lambda \cdot r) + \widehat{g}_2^{-1}((1 - \lambda) \cdot r),$$

dann folgt aus der Tatsache, daß  $\widehat{g}_1, \widehat{g}_2$  und  $g_1 \widehat{+} g_2$  streng monoton wachsen, und mittels der Identitat (2.5)

$$\begin{aligned} r &= (g_1 \widehat{+} g_2)((g_1 \widehat{+} g_2)^{-1}(r)) \\ &> (g_1 \widehat{+} g_2)(\widehat{g}_1^{-1}(\lambda \cdot r) + \widehat{g}_2^{-1}((1 - \lambda) \cdot r)) \\ &= \widehat{g}_1(\widehat{g}_1^{-1}(\lambda \cdot r) + \widehat{g}_2^{-1}((1 - \lambda) \cdot r)) + \widehat{g}_2(\widehat{g}_1^{-1}(\lambda \cdot r) + \widehat{g}_2^{-1}((1 - \lambda) \cdot r)) \\ &\geq \widehat{g}_1(\widehat{g}_1^{-1}(\lambda \cdot r)) + \widehat{g}_2(\widehat{g}_2^{-1}((1 - \lambda) \cdot r)) \\ &= \lambda \cdot r + (1 - \lambda) \cdot r \\ &= r. \end{aligned}$$

Das ist ein Widerspruch. Somit folgt die Behauptung.

4. Es gilt für alle  $n \in \mathbb{N}$

$$\widehat{t \circ g}(n) = t \circ g(0^n) = t(g(0^n)) = t(\widehat{g}(n)),$$

und daher folgt

$$\begin{aligned} \widehat{t \circ g}(r) &= (1 - r + \lfloor r \rfloor) \cdot t(\widehat{g}(\lfloor r \rfloor)) + (r - \lfloor r \rfloor) \cdot t(\widehat{g}(\lfloor r \rfloor + 1)) \\ &\geq t((1 - r + \lfloor r \rfloor) \cdot \widehat{g}(\lfloor r \rfloor) + (r - \lfloor r \rfloor) \cdot \widehat{g}(\lfloor r \rfloor + 1)) \\ &= t(\widehat{g}(r)). \end{aligned}$$

Dabei gilt die erste Ungleichung, da  $t \in \mathcal{MW}$  und somit konvex auf  $\mathbb{R}_0^+$  ist. ■

**Definition 2.31** *Unter dem erweiterten Levinschen Modell bzw. dem (erweiterten) Levinschen Vergleichsmodell verstehen wir  $\mathcal{L} = (H, V)$  mit*

$$H = \{g \in \mathcal{F} : g \text{ l\"angenwachsend}\}$$

und

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D}, g \in H \text{ und es gilt} \right. \\ \left. \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} < \infty \right\}.$$

Wir zeigen zunächst, daß  $\mathcal{L}$  eine Erweiterung des Levinschen Modells ist:

**Satz 2.32** *Das Vergleichsmodell  $\mathcal{L}$  ist eine Erweiterung des Levinschen Modells, das in Definition 2.2 definiert wurde.*

**Beweis:** Sei  $t \in \mathbb{N}$  und  $g(x) = |x|^t$ . Dann gilt für alle  $r \in \mathbb{R}_0^+$ :

$$(r + 1)^t \geq (\lceil r \rceil)^t \geq \widehat{g}(r) \geq (\lfloor r \rfloor)^t \geq (r - 1)^t.$$

Damit folgt für alle  $y$  im Bild der Funktion  $\widehat{g}$ , d.h. für  $y \geq 0$

$$y^{1/t} + 1 \geq \widehat{g}^{-1}(y) \geq y^{1/t} - 1.$$

Sei  $S = \{x \in \Sigma^* : f(x)^{1/t} < 1\}$ .

Dann folgt

$$\begin{aligned} &\left( \sum_{x \in \Sigma^+ \setminus S} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/t}}{|x|} \right) - 1 \\ &\leq \sum_{x \in \Sigma^+ \setminus S} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ &\leq \left( \sum_{x \in \Sigma^+ \setminus S} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/t}}{|x|} \right) + 1. \end{aligned}$$

Darüber hinaus gilt:

$$\sum_{x \in S} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \leq \sum_{x \in S} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(1)}{|x|} < \infty$$

und

$$\sum_{x \in S} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/t}}{|x|} \leq \sum_{x \in S} \gamma(x) \cdot \frac{1}{|x|} < \infty.$$

Also konvergiert

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/t}}{|x|}$$

genau dann, wenn

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|}$$

konvergiert, d.h.  $f$  ist im Levinschen Modell im Mittel polynomiell bezüglich  $\gamma$  genau dann, wenn es ein  $t \in \mathbb{N}$  so gibt, daß  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} |\cdot|^t$  gilt. Dabei bezeichnet  $|\cdot|^t$  die Funktion, die dem Wert  $x$  den Funktionswert  $|x|^t$  zuweist. ■

**Satz 2.33** *Das Vergleichsmodell  $\mathcal{L}$  ist ein schwaches average-case Modell.*

Bevor wir zum Beweis dieses Satzes kommen, charakterisieren wir die Menge  $\Omega_{\mathcal{L}}$ . Aus diesem Lemma kann dann die schwache Antisymmetrie gefolgert werden.

**Korollar 2.34**

1. *Im erweiterten Levinschen Modell gilt*

$$\Omega_{\mathcal{L}} = \{\omega : \text{Dichte auf } \mathbb{N}_0\}.$$

2. *Seien  $g \in H$  und  $\omega \in \Omega_{\mathcal{L}}$ . Dann dominiert die Funktion*

$$f(x) = \widehat{g} \left( \lceil |x| \cdot \max_{m \leq |x|} \{1, \omega(m)\}^{-1} \rceil \right)$$

*die Funktion  $g$  bezüglich  $\mathcal{L}$  und  $\omega$ .*

**Beweis:** Sei  $\omega$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$  und  $g \in \mathcal{F}$ . Dann gilt für alle  $x \in \Sigma^*$

$$\widehat{g}^{-1}(f(x)) \geq |x| \cdot \max_{m \leq |x|} \{1, \omega(m)\}^{-1}.$$

Sei  $\gamma \in \mathcal{D}_{\omega}$ , d.h. es gibt eine Konstante  $c > 0$ , so daß für alle  $n \in \mathbb{N}$  mit  $s_{\gamma}(n) = 1$

$$\gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \geq c \cdot \omega(n)$$

gilt. Darüber hinaus ist  $\gamma$  eine unendliche Dichte nach Definition von  $\mathcal{D}_\omega$ . Es gilt

$$\begin{aligned}
 & \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
 & \geq \sum_{\substack{n \in \mathbb{N} \\ s_\gamma(n)=1}} \gamma_{\mathbb{N}_0}(n) \cdot \frac{n \cdot \omega(n)^{-1}}{n} \\
 & \geq \sum_{\substack{n \in \mathbb{N} \\ s_\gamma(n)=1}} c \cdot \omega(n) \cdot \omega(n)^{-1} \\
 & = \infty.
 \end{aligned}$$

Somit gilt für alle  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$ , daß

$$f \not\leq_\gamma^{\mathcal{L}} g.$$

■

Wir beweisen nun, daß das erweiterte Levinsche Modell ein schwaches average-case Modell ist.

**Beweis von Satz 2.33:** Nach Definition ist  $\mathcal{L}$  unbeschränkt. Wir müssen zeigen, daß alle Eigenschaften eines schwachen average-case Modells vorliegen.

1. (WT):

- i. Seien  $f \leq_\gamma^{\mathcal{L}} g$ , und sei  $h$  eine längenwachsende Funktion mit  $g \leq h$ . Dann gilt gemäß der ersten Aussage von Lemma 2.30

$$\widehat{h}^{-1} \leq \widehat{g}^{-1}.$$

Sei  $N \in \mathbb{N}$  so gewählt, daß für alle  $r \geq N$

$$\widehat{h}^{-1}(r) \leq \widehat{g}^{-1}(r)$$

gilt. Ist  $f$  eine nach oben beschränkte Funktion und ist  $B \in \mathbb{N}$  eine obere Schranke von  $f$ , so ist

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} < \infty, \quad (2.6)$$

da  $\widehat{h}^{-1}(f(x)) \leq \widehat{h}^{-1}(B)$ .

Ist  $f$  nicht beschränkt, dann ist

$$\begin{aligned}
 & \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
 & = \sum_{f(x) < N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} + \sum_{f(x) \geq N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
 & \leq \sum_{f(x) < N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(N)}{|x|} + \sum_{f(x) \geq N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq \sum_{f(x) < N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(N)}{|x|} + \sum_{f(x) \geq N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
&\leq \sum_{f(x) < N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(N)}{|x|} + \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
&< \infty,
\end{aligned}$$

denn die erste Summe konvergiert gemäß Ungleichung (2.6) und die zweite Summe konvergiert, da  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} g$  gilt. Somit ist  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} h$ .

- ii. Seien  $f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g$  und  $g \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} h$ . Sei  $N \in \mathbb{N}$  so gewählt, daß für alle  $x \in \text{SUP}(\gamma)$  mit  $|x| \geq N$

$$f(x) \leq g(x)$$

gilt. Da  $h$  längenwachsend ist, ist  $\widehat{h}^{-1}$  monoton wachsend. Somit gilt für alle  $x \in \text{SUP}(\gamma)$  mit  $|x| \geq N$ :

$$\widehat{h}^{-1}(f(x)) \leq \widehat{h}^{-1}(g(x)).$$

Also folgt

$$\begin{aligned}
&\sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
&\leq \sum_{0 < |x| < N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} + \sum_{|x| \geq N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
&\leq \sum_{0 < |x| < N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} + \sum_{|x| \geq N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(g(x))}{|x|} \\
&\leq \sum_{0 < |x| < N} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} + \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(g(x))}{|x|} \\
&< \infty,
\end{aligned}$$

denn die erste Summe ist endlich und die zweite Summe konvergiert nach Voraussetzung. Somit folgt  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} h$ .

2. (SMA) und (WMA): Seien  $f_1 \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} g_1, f_2 \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} g_2$ . Sei  $N_1 = g_1(\varepsilon) + 1$  und  $N_2 = g_2(\varepsilon) + 1$ . Dann gilt nach Definition von  $g_1 \widehat{+} g_2$  und gemäß Lemma 2.30 für alle  $x \in \Sigma^*$ :

$$\begin{aligned}
&g_1 \widehat{+} g_2^{-1}(f_1(x) + f_2(x)) \\
&\leq g_1 \widehat{+} g_2^{-1}(\max(N_1, f_1(x)) + \max(N_2, f_2(x))) \\
&\leq \widehat{g}_1^{-1}(\lambda \cdot (\max(N_1, f_1(x)) + \max(N_2, f_2(x)))) \\
&\quad + \widehat{g}_2^{-1}((1 - \lambda) \cdot (\max(N_1, f_1(x)) + \max(N_2, f_2(x)))) \\
&\leq \widehat{g}_1^{-1}(\max(N_1, f_1(x))) + \widehat{g}_2^{-1}(\max(N_2, f_2(x))),
\end{aligned}$$

mit

$$\lambda = \frac{\max(N_1, f_1(x))}{\max(N_1, f_1(x)) + \max(N_2, f_2(x))}.$$

Dann ist

$$\begin{aligned}
 & \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g_1 + g_2}^{-1}(f_1(x) + f_2(x))}{|x|} \\
 & \leq \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g_1}^{-1}(\max(N_1, f_1(x)))}{|x|} + \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g_2}^{-1}(\max(N_2, f_2(x)))}{|x|} \\
 & \leq \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g_1}^{-1}(N_1)}{|x|} + \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g_2}^{-1}(N_2)}{|x|} \\
 & \quad + \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g_1}^{-1}(f_1(x))}{|x|} + \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g_2}^{-1}(f_2(x))}{|x|} \\
 & < \infty,
 \end{aligned}$$

da  $f_1 \leq_{\mathcal{L}}^{\gamma} g_1$  und  $f_2 \leq_{\mathcal{L}}^{\gamma} g_2$  gilt. Somit ist  $f_1 + f_2 \leq_{\mathcal{L}}^{\gamma} g_1 + g_2$ . Also ist  $\mathcal{L}$  stark additiv monoton.

Aus dem Beweis von Satz 2.26 folgt, daß  $\mathcal{L}$  auch schwach additiv monoton ist.

3. (MK): Sei  $t \in \mathcal{MW}$  und  $f \leq_{\mathcal{L}}^{\gamma} g$ . Dann ist  $t \circ g$  längenwachsend, da  $g \in H$  längenwachsend und  $t$  streng monoton wachsend auf  $\mathbb{R}_0^+$  ist. Somit ist

$$t \circ g \in H.$$

Nach Lemma 2.30 folgt

$$\widehat{t \circ g} \geq t \circ \widehat{g},$$

und damit ist

$$(\widehat{t \circ g})^{-1} \leq \widehat{g}^{-1} \circ t^{-1}.$$

Daher ist

$$\begin{aligned}
 \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{(\widehat{t \circ g})^{-1}(t(f(x)))}{|x|} & \leq \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(t^{-1}(t(f(x))))}{|x|} \\
 & = \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\
 & < \infty,
 \end{aligned}$$

und es gilt  $t \circ f \leq_{\mathcal{L}}^{\gamma} t \circ g$ .

4. (V): Sei  $\gamma \in \mathcal{D}$ . Seien  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g$  längenwachsend und  $f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g$ . Sei  $N \in \mathbb{N}$  so gewählt, daß für alle  $x \in \text{SUP}(\gamma)$  mit  $|x| \geq N$  gilt:  $f(x) \leq g(x) = \widehat{g}(|x|)$ . Dann folgt für fast alle  $x \in \text{SUP}(\gamma)$  mit  $|x| \geq N$

$$\widehat{g}^{-1}(f(x)) \leq |x|.$$

Da für die endlich vielen  $x \in \Sigma^*$  mit  $|x| \leq N$  der Wert

$$\widehat{g}^{-1}(f(x))$$

durch eine Konstante beschränkt wird, folgt insgesamt

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} < \infty.$$

5. (MV): Sei  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} g$  und  $\tau \leq_{(f,g)} \gamma$ . Seien  $S_1 = \{x : f(x) > g(x)\}$  und  $S_2 = \Sigma^+ \setminus S_1$ . Für alle  $x \in S_2$  gilt dann

$$\widehat{g}^{-1}(f(x)) \leq |x|,$$

denn

$$f(x) \leq g(x) = \widehat{g}(|x|).$$

Da  $\tau \leq_{(f,g)} \gamma$  ist, folgt für alle  $x \in S_1$ , daß  $\tau(x) \leq \gamma(x)$  gilt. Sei

$$S_3 = \{x \in S_1 : \tau(x) \leq \gamma(x)\}.$$

Dann ist die folgende Summe endlich:

$$c = \sum_{x \in S_1 \setminus S_3} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} < \infty.$$

Damit folgt

$$\begin{aligned} & \sum_{x \in \Sigma^+} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ &= \left( \sum_{x \in S_1} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \right) + \left( \sum_{x \in S_2} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \right) \\ &\leq \left( \sum_{x \in S_1} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \right) + 1 \\ &\leq \left( \sum_{x \in S_1} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \right) + 1 \\ &\leq \left( \sum_{x \in S_3} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \right) + 1 + c \\ &\leq \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} + 1 + c \\ &< \infty. \end{aligned}$$

Dabei gilt die letzte Ungleichung, da  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} g$  gilt. Somit folgt  $f \leq_{\tau}^{\mathcal{L}} g$ .

6. (WA): Die Eigenschaft der schwachen Antisymmetrie folgt aus Korollar 2.34. ■

Man beachte, daß nach Satz 2.19 keine Erweiterung des Levinschen Modells ein starkes average-case Modell ist.

Unsere Erweiterung des Levinschen Modells ist unabhängig von den in [2] und in [14] vorgestellten Verallgemeinerungen entstanden. Die Formalisierungen sind in allen Fällen recht ähnlich.

### Das PolySum2-Modell

**Definition 2.35** Als PolySum2-Modell bezeichnen wir das Vergleichsmodell  $\mathcal{S} = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } t \in \mathbb{N} \text{ gilt } \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^t \cdot \gamma(x) < \infty \right\}.$$

Das PolySum2-Modell ist ein Spezialfall einer ganzen Familie von Modellen. Wir geben zunächst einen Satz über diese allgemeineren Modelle an und leiten dann die entsprechenden Sätze für das PolySum2-Modell ab.

### Satz 2.36

1. Sei  $w : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}$  eine Funktion, für die

$$\sum_{n \geq 0} \frac{1}{w(n)} < \infty$$

gilt. Sei  $R = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und es gilt } \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) < \infty \right\}.$$

Dann ist  $R$  ein schwaches aber kein starkes average-case Modell.

2. Die Menge  $\Omega_R$  enthält die Menge aller unendlichen Dichten  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$ , die

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \omega(n) > 0}} \frac{1}{w(n) \cdot \omega(n)} < \infty$$

erfüllen.

3. Sei  $g \in \mathcal{F}$ . Die Funktion  $f(x) = g(x) + 1$  dominiert  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  für alle  $\omega \in \Omega_R$ .

**Beweis:** Es folgt aus der Definition, daß  $R$  unbeschränkt ist.

Wählt man zwei Funktionen  $f, g$  mit  $f > g$  und

$$\gamma(x) = c \cdot \frac{1}{w(|x|) \cdot |x|^2 \cdot 2^{|x|}},$$

wobei  $c$  die Normierungskonstante ist, so ist

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) \leq \sum_{n \in \mathbb{N}} w(n) \cdot \frac{c}{w(n) \cdot n^2} < \infty.$$

Somit ist  $R$  nicht stark antisymmetrisch und daher kein starkes average-case Modell. Gegeben eine Dichte  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$ , so daß

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \omega(n) > 0}} \frac{1}{w(n) \cdot \omega(n)} < \infty$$

gilt, dann gibt es eine Konstante  $d > 0$ , so daß für alle  $n \in \text{SUP}(\omega)$  gilt

$$d \cdot \frac{1}{w(n)} < \omega(n).$$

Sei  $g \in \mathcal{F}$ . Setze  $f(x) = g(x) + 1$ . Sei  $\gamma \in \mathcal{D}_\omega$ . Dann gilt nach Definition von  $\mathcal{D}_\omega$

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) \geq \sum_{\substack{n \in \mathbb{N}_0 \\ s_\gamma(n)=1}} w(n) \cdot c' \cdot \omega(n) \geq \sum_{\substack{n \in \mathbb{N}_0 \\ s_\gamma(n)=1}} c' \cdot d = \infty$$

für eine geeignete Konstante  $c'$ , denn nach Definition ist  $\gamma$  eine unendliche Dichte. Somit ist  $f \not\leq_\gamma^R g$  und für alle  $\omega \in \Omega_R$  dominiert  $f$  die Funktion  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$ .

Es folgt:  $\Omega_R$  enthält die Menge aller unendlichen Dichten  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$ , die

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \omega(n) > 0}} \frac{1}{w(n) \cdot \omega(n)} < \infty$$

erfüllen. Zum Beispiel ist  $\omega(n) = \frac{c}{w(n)} \in \Omega_R$ , wobei  $c$  die Normierungskonstante ist, denn es gilt:

$$\sum_{n \geq 0} \frac{1}{w(n)} < \infty.$$

Wir zeigen nun die restlichen Eigenschaften, die zum Beweis, daß  $R$  ein schwaches average-case Modell ist, nötig sind.

1. (ST) und (WT): Seien  $f \leq_\gamma^R g, g \leq_\gamma^R h$ , dann gilt

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) &< \infty, \\ \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ g(x) > h(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) &< \infty. \end{aligned}$$

Wenn  $f(x) > h(x)$  gilt, folgt  $f(x) > g(x)$  oder  $g(x) > h(x)$ , und damit folgt

$$\begin{aligned} &\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > h(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) \\ &\leq \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) + \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ g(x) > h(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) \\ &< \infty. \end{aligned}$$

Also gilt  $f \leq_\gamma^R h$ . Daher ist  $R$  stark transitiv und somit auch schwach transitiv.

2. (SMA) und (WMA): Läßt sich analog zu (ST) beweisen.
3. (MK): Man sieht leicht, daß diese Eigenschaft vorliegt.
4. (V): Sei  $\gamma \in \mathcal{D}$ . Sei  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g \in \mathcal{H}$  und  $f \leq_{\text{SUP}(\gamma)} g$ . Dann gibt es nur endlich viele  $x \in \text{SUP}(\gamma)$  mit  $f(x) > g(x)$ . Somit ist die Summe

$$\sum_{\substack{x \in \text{SUP}(\gamma) \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x)$$

endlich und konvergiert.

5. (MV): Ist  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g \in \mathcal{H}$  mit  $f \leq_{\gamma}^R g$  und ist  $\tau$  eine Dichte, so daß für fast alle  $x$  mit  $f(x) > g(x)$  gilt  $\tau(x) \leq \gamma(x)$ , dann folgt:

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \tau(x) \leq c + \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w(|x|) \cdot \gamma(x) < \infty.$$

Dabei ist

$$c = \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x) \wedge \tau(x) > \gamma(x)}} w(|x|) \cdot \tau(x) < \infty.$$

Somit gilt (MV).

6. (WA): Aus der oben gezeigten Aussage über  $\Omega_R$  folgt direkt, daß  $R$  schwach antisymmetrisch ist. ■

Die Bedingung im obigen Satz an die Funktion  $w$  ist wichtig, um sicherzustellen, daß  $R$  schwach antisymmetrisch ist. Sie ist jedoch nur eine hinreichende und keine notwendige Bedingung.

Aus dem Konstruktionsprinzip für schwache average-case Modelle folgt:

**Satz 2.37**

1. Sei  $W = \{w_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine Folge von Funktionen  $w_i : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}$  mit

$$\sum_{n \in \mathbb{N}_0} \frac{1}{w_i(n)} < \infty.$$

Dann ist  $R = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \left\{ (f, \gamma, g) : \gamma \in \mathcal{D} \text{ und für alle } i \in \mathbb{N} \text{ gilt } \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w_i(|x|) \cdot \gamma(x) < \infty \right\}$$

ein schwaches aber kein starkes average-case Modell.

2. Die Menge  $\Omega_R$  enthält alle unendlichen Dichten  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$ , die

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \omega(n) > 0}} \frac{1}{w_i(n) \cdot \omega(n)} < \infty$$

für ein  $i \in \mathbb{N}$  erfüllen.

3. Sei  $g \in \mathcal{F}$ . Die Funktion  $f(x) = g(x) + 1$  dominiert  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  für alle  $\omega \in \Omega_R$ .

**Beweis:** Aus Satz 2.10 und Satz 2.25 folgen alle Behauptungen bis auf die Aussage, daß  $R$  kein starkes average-case Modell ist.

Wir setzen dazu

$$w(n) = \frac{c}{\max\{w_1(n), \dots, w_n(n)\}},$$

wobei  $c$  die Normierungskonstante ist. Somit ist  $w$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$ . Sei  $g \in \mathcal{F}$  eine beliebige Funktion, und sei  $f \in \mathcal{F}$ ,  $f > g$ . Setze

$$\gamma(x) = d \cdot \frac{1}{|x|^2 \cdot w(|x|) \cdot 2^{|x|}},$$

wobei  $d$  die Normierungskonstante ist. Für alle  $i \in \mathbb{N}$  gilt dann

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} w_i(|x|) \cdot d \cdot \frac{1}{|x|^2 \cdot w(|x|) \cdot 2^{|x|}} < \sum_{n \geq 1} \frac{d}{n^2} < \infty.$$

Somit gilt  $f \leq_\gamma^R g$  im Widerspruch zur starken Antisymmetrieeigenschaft. ■

Wir folgern die nachstehenden Aussagen über das PolySum2-Modell:

### Satz 2.38

1. Das Vergleichsmodell  $\mathcal{S}$  ist ein schwaches average-case Modell, aber kein starkes average-case Modell.

2. Die Menge  $\Omega_{\mathcal{S}}$  enthält alle unendlichen Dichten  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$ , für die es ein  $t \geq 1$  gibt mit

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \omega(n) > 0}} \frac{1}{n^t \cdot \omega(n)} < \infty.$$

### Weitere positive Beispiele

Das von R. Reischuk und Ch. Schindelhauer neu in [13] vorgestellte Modell ist ebenfalls ein schwaches average-case Modell. Es ist nicht stark monoton bezüglich Addition aber schwach monoton bezüglich Addition. Die bisher vorgestellten Beispiele waren stets stark monoton bezüglich Addition. Wir verzichten hier auf die Darstellung des von Reischuk vorgestellten Modells und den Nachweis, daß es ein schwaches average-case Modell ist, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

### 2.4.5 Negative Beispiele

Wir geben in diesem Abschnitt drei Beispiele für unbeschränkte Vergleichsmodelle an, die keine schwachen average-case Modelle sind.

Ein triviales Beispiel ist  $\mathcal{W} = (\mathcal{F}, \mathcal{F} \times \mathcal{D} \times \mathcal{F})$ . Man sieht leicht, daß  $\mathcal{W}$  nicht schwach antisymmetrisch und damit kein schwaches average-case Modell ist.

In Abschnitt 2.2 haben wir einen Spezialfall des *Erwartungswert-Modells*, das wie folgt definiert ist, erwähnt:  $\mathcal{E} = (\mathcal{F}, V)$  mit

$$V = \{(f, \gamma, g) : \text{für fast alle } n \in \mathbb{N}_0 \text{ gilt } s_\gamma(n) \cdot E_{\gamma_n}[f(X)] \leq s_\gamma(n) \cdot E_{\gamma_n}[g(X)]\}.$$

**Satz 2.39** *Das Erwartungswert-Modell ist kein schwaches average-case Modell.*

**Beweis:** Wir haben in Abschnitt 2.2 bereits ein Beispiel angegeben, das zeigt, daß das Erwartungswert-Modell nicht monoton bezüglich Komposition ist. ■

Man sieht aber leicht, daß das Erwartungswert-Modell die Eigenschaften (ST), (SMA), (MV), (SA) und (V) hat.

Als drittes Beispiel untersuchen wir Vergleichsmodelle folgender Bauart: Eine mögliche Vorgehensweise zur Konstruktion von Vergleichsmodellen könnte zum Beispiel darin bestehen, daß man einem Paar aus Verteilung und Funktion einen reellen Wert, eine Art ‘‘Maß’’, zuordnet und zwei Funktionen unter einer Verteilung vergleicht, indem man ihre entsprechenden Werte vergleicht. Genauer:

Sei  $w : \mathcal{F} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  eine Abbildung. Sei  $H \subseteq \mathcal{F}$ . Dann ist  $R_{H,w} = (H, V_w)$  mit

$$V_w = \{(f, \gamma, g) : g \in H \text{ und es gilt } w(f, \gamma) \leq w(g, \gamma)\}$$

ein Vergleichsmodell, wie man leicht sieht.

Es gilt der folgende Satz:

**Satz 2.40** *Für keine unbeschränkte Menge  $H \subseteq \mathcal{F}$  gibt es eine Funktion*

$$w : \mathcal{F} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\},$$

*so daß  $R_{H,w}$  ein schwaches average-case Modell ist.*

**Beweis:** Wir nehmen an, es gäbe ein  $w$ , so daß  $R = R_{H,w}$  ein schwaches average-case Modell ist. Dann ist  $\Omega_R \neq \emptyset$ . Sei  $\omega \in \Omega_R$  und  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$ . Sei  $B = \sup_{h \in H} \{w(h, \mu)\}$ . Dann gibt es eine Folge  $\{h_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  mit  $h_i \in H$ , so daß

$$\lim_{i \rightarrow \infty} w(h_i, \mu) = B$$

gilt.

Setze  $g(x) = \max\{h_1(x), \dots, h_{|x|}(x)\} + |x|$ . Dann ist für alle  $i \in \mathbb{N}_0$

$$h_i \leq g.$$

Da  $H$  unbeschränkt ist, gibt es ein  $h \in H$  mit

$$g \leq h.$$

Also gilt gemäß der Eigenschaft der Verträglichkeit für alle  $i \in \mathbb{N}_0$

$$w(h_i, \mu) \leq w(h, \mu).$$

Daraus folgt

$$w(h, \mu) \geq B.$$

Es gibt gemäß der Eigenschaft der schwachen Antisymmetrie ein  $f \in H$ , so daß

$$f \not\leq_{\mu}^R h.$$

Somit gilt

$$B \leq w(h, \mu) < w(f, \mu).$$

Dies ist ein Widerspruch zur Definition von  $B$ . ■

## 2.5 Vergleichsmodelle unter Nicht-Standardaufzählungen

In den vorausgegangenen Abschnitten haben wir die Standardaufzählung unseren Definitionen und Resultaten zugrunde gelegt. Man kann jedoch in analoger Weise für jede beliebige wiederholungsfreie Aufzählung von  $\Sigma^*$  die verschiedenen Beispiele für Vergleichsmodelle definieren und die Ergebnisse über diese beweisen. Ist  $\phi$  eine beliebige wiederholungsfreie Aufzählung von  $\Sigma^*$ , so genügt es, in den Abschnitten 2.2 bis 2.4.3 jeweils  $\Sigma^n$  durch  $M_n^{\phi}$ ,  $|\cdot|$  durch die Funktion  $\ell^{\phi}$  und in der Definition des  $\hat{\cdot}$ -Operators in Gleichung (2.4) die Argumente  $0^{\lfloor r \rfloor}$  und  $0^{\lfloor r \rfloor + 1}$  durch  $\phi^{-1}(2^{\lfloor r \rfloor - 1})$  bzw. durch  $\phi^{-1}(2^{\lfloor r \rfloor})$  zu ersetzen.

## Kapitel 3

# Klassen von Dichten und Sprachklassen

In Abschnitt 2.1 haben wir Dichten und Verteilungen auf unendlichen Mengen definiert. In der Literatur werden unterschiedliche Klassen von Dichten untersucht, die wir im folgenden zusammen mit weiteren, für den Rest der Arbeit wichtigen Begriffen einführen werden. Wir werden bekannte Resultate über die Beziehungen zwischen diesen Dichteklassen zitieren und eigene neue Ergebnisse vorstellen.

### 3.1 Dominanzbegriffe

#### 3.1.1 Funktionenweise Dominanz

Ist  $R$  ein Vergleichsmodell und gilt  $f \leq_{\gamma}^R g$ , so interessiert man sich dafür, welche Dichten  $\tau$  ebenfalls  $f \leq_{\tau}^R g$  erfüllen. Im Modell  $\mathcal{FU}$  kann diese Frage leicht beantwortet werden: Wenn  $|SUP(\tau) \setminus SUP(\gamma)| < \infty$  und  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{FU}} g$  gilt, folgt  $f \leq_{\tau}^{\mathcal{FU}} g$ .

Allgemein definieren wir

**Definition 3.1** *Ist  $R$  ein Vergleichsmodell und sind  $\gamma, \tau \in \mathcal{D}$  zwei Dichten mit der Eigenschaft, daß für alle  $f, g \in \mathcal{F}$  mit  $f \leq_{\gamma}^R g$  auch  $f \leq_{\tau}^R g$  gilt, so sagen wir,  $\gamma$  dominiert  $\tau$  funktionenweise bezüglich  $R$ .*

#### 3.1.2 Dominanz bezüglich einer Menge von Funktionen

In vielen Fällen vergleicht man eine Laufzeitfunktion nicht mit einer bestimmten anderen Funktion, sondern mit einer Klasse von Funktionen. So wird zum Beispiel in der ursprünglichen Levinschen Definition (Definition 2.2) die Laufzeitfunktion mit der Menge der Polynomfunktionen verglichen. Wir führen daher folgende Definition ein:

**Definition 3.2** Ist  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell,  $C \subseteq \mathcal{F}$  und ist  $\gamma \in \mathcal{D}$ , so setzen wir

$$C_\gamma^R = \{f \in \mathcal{F} : \text{es gibt ein } g \in C \cap H \text{ mit } f \leq_\gamma^R g\}.$$

Ist  $Pol$  die Menge aller Funktionen  $|\cdot|^t$  mit  $t \in \mathbb{N}$ , so ist  $Pol_\gamma^R$  die Menge aller Funktionen, die im Mittel polynomiell bezüglich  $\gamma$  und  $R$  sind.

**Definition 3.3** Die Dichte  $\gamma \in \mathcal{D}$  dominiert die Dichte  $\tau \in \mathcal{D}$  bezüglich  $R$  und  $C$ , wenn gilt

$$C_\gamma^R \subseteq C_\tau^R.$$

Somit ist die ‐funktionenweise‐ Dominanz ein Spezialfall des obigen Dominanzbegriffs. Dominiert  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  funktionenweise bezüglich eines Vergleichsmodells  $R = (H, V)$ , so dominiert  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  auch bezüglich  $R$  und jeder Menge  $C \subseteq H$ .

Wir untersuchen nun das PolySum2-Modell  $\mathcal{S}$ :

Wir sagen, eine Dichte  $\gamma$  begrenzt die Dichte  $\tau$  polynomiell, wenn es ein  $s \in \mathbb{N}$  gibt, so daß für fast alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:

$$\tau(x) \leq |x|^s \cdot \gamma(x).$$

Ist  $f \leq_\gamma^{\mathcal{S}} g$ , so ist für alle  $t \in \mathbb{N}$

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^t \cdot \tau(x) \leq \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^{t+s} \cdot \gamma(x) < \infty.$$

Somit gilt  $f \leq_\tau^{\mathcal{S}} g$ , und es ergibt sich folgendes Lemma:

**Lemma 3.4** Im  $\mathcal{FU}$ -Modell und im PolySum2-Modell gilt: Begrenzt  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  polynomiell, so wird  $\tau$  funktionenweise von  $\gamma$  dominiert.

Im  $\mathcal{FU}$ -Modell gilt die diese Aussage, da für jede Dichte  $\tau$ , die von einer Dichte  $\gamma$  polynomiell begrenzt wird, gilt:

$$|SUP(\tau) \setminus SUP(\gamma)| < \infty.$$

Im erweiterten Levinschen Modell  $\mathcal{L}$  gilt diese Aussage dagegen nicht, wie folgendes Beispiel zeigt. Sei  $f(x) = |x|^2$  und  $g(x) = |x|$ ,  $\gamma(x) = c_1 \cdot \frac{1}{|x|^3} \cdot 2^{-|x|}$  und  $\tau(x) = c_2 \cdot \frac{1}{|x|^2} \cdot 2^{-|x|}$ , wobei  $c_1, c_2$  die Normierungskonstanten sind. Dann ist

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{f(x)^{1/1}}{|x|} &= \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot |x| \\ &= \sum_{n \in \mathbb{N}} c_1 \cdot \frac{n}{n^3} \\ &< \infty. \end{aligned}$$

Aber es gilt

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \Sigma^+} \tau(x) \cdot \frac{f(x)^{1/1}}{|x|} &= \sum_{x \in \Sigma^+} \tau(x) \cdot |x| \\ &= \sum_{n \in \mathbb{N}} c_2 \cdot \frac{n}{n^2} \\ &= \infty. \end{aligned}$$

Somit begrenzt  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  zwar polynomiell, aber es gilt  $f \leq_{\gamma}^{\mathcal{L}} g$ , während  $f \not\leq_{\tau}^{\mathcal{L}} g$  ist.

Geht man jedoch von der funktionenweise Dominanz zur Dominanz bezüglich Mengen von Funktionen  $C$  über, so läßt sich eine Lemma 3.4 entsprechende Aussage für bestimmte Mengen  $C$  machen.

Um diese benennen zu können, führen wir folgende Definitionen ein:

**Definition 3.5** Sei  $g : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ . Wir definieren

$$P(g) = \left\{ h \in \mathcal{F} : \text{es gibt } t \in \mathbb{N} \text{ mit } h(x) \leq \left( t \cdot \max_{|y| \leq |x|^t} g(y) \right)^t \text{ für alle } x \in \Sigma^* \right\}.$$

Entsprechend sei für  $C \subseteq \mathcal{F}$

$$P(C) = \bigcup_{g \in C} P(g).$$

Dann gilt folgendes Lemma:

**Lemma 3.6** Für  $C \subseteq \mathcal{F}$  gilt  $P(C) = P(P(C))$ .

**Beweis:** Offensichtlich ist  $P(C) \subseteq P(P(C))$ .

Sei  $h \in P(P(C)) \setminus P(C)$ . Dann gibt es ein  $g \in P(C)$  und ein  $t_1 \in \mathbb{N}$ , so daß

$$h(x) \leq \left( t_1 \cdot \max_{|y| \leq |x|^{t_1}} g(y) \right)^{t_1}$$

gilt, und es gibt ein  $r \in C$  und ein  $t_2 \in \mathbb{N}$ , so daß

$$g(y) \leq \left( t_2 \cdot \max_{|z| \leq |y|^{t_2}} r(z) \right)^{t_2}$$

gilt, woraus

$$h(x) \leq \left( t_1 \cdot t_2 \cdot \max_{|z| \leq |x|^{t_1 \cdot t_2}} r(z) \right)^{t_1 \cdot t_2}$$

folgt. Also ist  $h \in P(C)$ , und somit ist das Lemma bewiesen. ■

Wegen dieser Abschlußeigenschaft nennen wir  $P(C)$  den *P-Abschluß* von  $C$ . Gilt  $C = P(C)$ , so heißt  $C$  *P-abgeschlossen*.

**Satz 3.7** Sei das erweiterte Levinsche Modell  $\mathcal{L} = (H, V)$  gegeben,  $C \subseteq \mathcal{F}$ . Begrenzt  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  polynomiell, so dominiert  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  bezüglich  $\mathcal{L}$  und  $P(C)$ .

**Beweis:** Gelte für fast alle  $x \in \Sigma^*$

$$\tau(x) \leq |x|^s \cdot \gamma(x).$$

Sei  $f \in P(C)_\gamma^R$ , dann gibt es eine längenwachsende Funktion  $g \in P(C) \cap H$  mit  $f \leq_\gamma^{\mathcal{L}} g$ . Sei

$$h(x) = 2 \cdot \max_{|y| \leq |x|^{s+1}} g(y) = 2 \cdot \hat{g}(|x|^{s+1}).$$

Dann ist  $h \in P(C) \cap H$  und es gibt eine Schranke  $N$ , so daß für alle  $r > N$  gilt

$$\hat{h}^{-1}(r) \leq \hat{g}^{-1}(r)^{\frac{1}{s+1}}.$$

Denn für alle  $n \in \mathbb{N}$  gilt

$$\hat{h}(n) = 2 \cdot \hat{g}(n^{s+1}),$$

und damit

$$\hat{h}^{-1}(r) \leq \hat{h}^{-1}(\lceil r \rceil) = \hat{g}^{-1}(\lceil r \rceil / 2)^{1/(s+1)} \leq \hat{g}^{-1}(r)^{1/(s+1)}.$$

Setze

$$c = \sum_{\substack{x \in \Sigma^+ \\ f(x) \leq N}} \tau(x) \cdot \frac{\hat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} < \infty$$

und

$$S = \{x \in \Sigma^+ : f(x) > N \text{ und } \hat{g}^{-1}(f(x))^{1/(s+1)} > |x|\}.$$

Dann gilt für alle  $x \in S$  die Ungleichung

$$\begin{aligned} \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))^{1/(s+1)}}{|x|} &\leq \left( \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))^{1/(s+1)}}{|x|} \right)^{s+1} \\ &\leq \frac{1}{|x|^s} \cdot \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))}{|x|}. \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} \sum_{x \in S} \tau(x) \cdot \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))^{1/(s+1)}}{|x|} &\leq \sum_{x \in S} \tau(x) \cdot \left( \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))^{1/(s+1)}}{|x|} \right)^{s+1} \\ &\leq \sum_{x \in S} \tau(x) \cdot \frac{1}{|x|^s} \cdot \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ &\leq \sum_{x \in S} \gamma(x) \cdot \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ &\leq \sum_{x \in \Sigma^+} \gamma(x) \cdot \frac{\hat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ &< \infty. \end{aligned}$$

Es ist darüber hinaus

$$\sum_{x \in \Sigma^+ \setminus S} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))^{\frac{1}{s+1}}}{|x|} < \infty.$$

Damit folgt

$$\begin{aligned} & \sum_{x \in \Sigma^+} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ & \leq c + \sum_{\substack{x \in \Sigma^+ \\ f(x) > N}} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))^{\frac{1}{s+1}}}{|x|} \\ & \leq c + \sum_{x \in S} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))^{\frac{1}{s+1}}}{|x|} + \sum_{x \in \Sigma^+ \setminus S} \tau(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))^{\frac{1}{s+1}}}{|x|} \\ & < \infty. \end{aligned}$$

Somit ist  $f \leq_{\tau}^{\mathcal{L}} h$  und damit  $f \in P(C)_{\tau}^{\mathcal{L}}$ . ■

### 3.1.3 Die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz

**Definition 3.8** Sei  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell. Gilt für alle  $C \subseteq \mathcal{F}$ , alle  $\gamma \in \mathcal{D}$  und alle  $\tau \in \mathcal{D}$ , die von  $\gamma$  polynomiell begrenzt werden, daß  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  bezüglich  $R$  und  $P(C)$  dominiert, so sagen wir,  $R$  hat die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz.

Aus dieser Definition ergibt sich das folgende Lemma:

**Lemma 3.9** Ist  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell, das die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz hat, sind  $\gamma, \tau \in \mathcal{D}$  und begrenzt  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  polynomiell, so gibt es für alle  $f \in \mathcal{F}$ ,  $g \in H$  mit  $f \leq_{\gamma}^R g$  ein  $\tilde{g} \in P(\{g\}) \cap H$  mit:

$$f \leq_{\tau}^R \tilde{g}.$$

Dabei gilt insbesondere, daß es ein  $t \in \mathbb{N}$  gibt mit

$$\tilde{g}(x) \leq \left( t \cdot \max_{|y| \leq |x|^t} g(y) \right)^t$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ .

Nach den obigen Überlegungen gilt der folgende Satz:

**Satz 3.10** Das Modell  $\mathcal{FU}$ , das PolySum2-Modell  $\mathcal{S}$  und das erweiterte Levinsche Modell  $\mathcal{L}$  haben die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz.

Es gibt dagegen auch Beispiele für schwache average-case Modelle, die die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz nicht haben, wie folgendes Lemma zeigt.

**Lemma 3.11** *Das PolySum1-Modell  $\mathcal{MS}$  hat die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz nicht.*

**Beweis:** Sei  $C = \{f \in \mathcal{F} : \text{es gibt ein } t \in \mathbb{N} \text{ mit } f \leq |\cdot|^t\}$ . Ist

$$\tau(x) = \begin{cases} \frac{c_1}{2^{|x|} \cdot |x|^2} & \text{falls } x \in \{1\}^*, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

und

$$\gamma(x) = \frac{c_2}{|x|^2 \cdot 2^{|x|}},$$

wobei  $c_1, c_2$  die Normierungskonstanten sind, so ist

$$\tau(x) \leq \frac{c_1}{c_2} \cdot \gamma(x).$$

Sei weiter

$$f(x) = \begin{cases} 2^{|x|} & \text{falls } x \in \{1\}^*, \\ 1 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dann gilt für alle  $n \in \mathbb{N}$  und alle  $t \in \mathbb{N}$

$$s_\gamma(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > |x|^t}} n^t \cdot \gamma_n(x) = n^t \cdot \frac{1}{2^n}.$$

Somit ist  $f \in C_\gamma^{\mathcal{MS}}$ . Aber für alle  $n, s \in \mathbb{N}$  ist

$$s_\tau(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ f(x) > |x|^s}} n^2 \cdot \tau_n(x) = n^2 \cdot 1.$$

Damit ist  $f \notin C_\tau^{\mathcal{MS}}$ , obwohl  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  polynomiell begrenzt. ■

## 3.2 Universelle Dichten

Gegeben ein Vergleichsmodell  $R = (H, V)$ , eine Funktionenmenge  $C \subseteq \mathcal{F}$ , eine Teilmenge  $D \subseteq \mathcal{D}$  und eine Dichte  $\gamma \in D$ , die alle  $\tau \in D$  bezüglich  $C$  und  $R$  dominiert. Dann folgt für alle  $f \in C_\gamma^R$  und  $\tau \in D$ , daß  $f \in C_\tau^R$  gilt. Daher ist  $\gamma$  gewissermaßen eine “schwierigste” Dichte unter allen Dichten  $\tau$ . In der folgenden Definition führen wir einen Namen für solche Dichten ein.

**Definition 3.12** *Sei  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell,  $C \subseteq \mathcal{F}$  und  $D \in \mathcal{D}$ . Eine Dichte  $\gamma \in \mathcal{D}$  heißt  $D$ -universell bezüglich  $C$  und  $R$ , falls für alle  $\tau \in D$  gilt:  $\gamma$  dominiert  $\tau$  bezüglich  $R$  und  $C$ .*

### 3.3 P-abgeschlossene Funktionenmengen

Wir benutzen folgende Bezeichnungen:

$$\begin{aligned} \text{Log} &= \{f \in \mathcal{F} : \exists t \in \mathbb{N} \ f \leq (\log_2(|\cdot| + 1))^t\}, \\ \text{Pol} &= \{f \in \mathcal{F} : \exists t \in \mathbb{N} \ f \leq |\cdot|^t\}, \\ \text{Exp} &= \{f \in \mathcal{F} : \exists t \in \mathbb{N} \ f \leq 2^{|\cdot|^t}\}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Wie man leicht sieht, gilt das folgende Lemma:

**Lemma 3.13** *Die Mengen  $\text{Log}$ ,  $\text{Pol}$ ,  $\text{Exp}$  sind P-abgeschlossen.*

Dagegen ist zum Beispiel die Menge der linearen Funktionen

$$\text{Lin} = \{f \in \mathcal{F} : \exists t \in \mathbb{N} \ f \leq t \cdot |\cdot|\}$$

nicht P-abgeschlossen.

Eine weitere Eigenschaft der Mengen  $\text{Log}$ ,  $\text{Pol}$ ,  $\text{Exp}$  wird im folgenden Lemma geschrieben.

**Lemma 3.14** *Ist  $C \in \{\text{Lin}, \text{Log}, \text{Pol}, \text{Exp}\}$ , so gibt es für alle  $f \in C$  ein  $f' \in C$  mit  $f \leq f'$ , das längenwachsend ist.*

### 3.4 Stabile Funktionenmengen

Infolge der Verträglichkeitseigenschaft gilt der folgende Satz:

**Satz 3.15** *Für alle schwachen average-case Modelle  $R = (H, V)$ , alle  $C \subseteq H$  und alle  $\gamma \in \mathcal{D}$  gilt*

$$C \subseteq C_\gamma^R.$$

Somit gilt insbesondere

$$C \subseteq \bigcap_{\gamma \in \mathcal{D}} C_\gamma^R.$$

Die Mengen  $C \subseteq \mathcal{F}$ , für die sogar

$$C = \bigcap_{\gamma \in \mathcal{D}} C_\gamma^R$$

gilt, nennen wir *stabil* bezüglich  $R$ .

Wir geben eine hinreichende Bedingung dafür an, daß eine Menge  $C$  bezüglich eines Vergleichsmodells  $R$  stabil ist. Dazu benötigen wir noch einige Begriffe:

Wir nennen eine Menge  $C \subseteq \mathcal{F}$  bezüglich  $\leq$  *abgeschlossen*, wenn für alle  $f \in C$  und  $g \in \mathcal{F}$  mit  $g \leq f$  gilt:  $g \in C$ .

Eine Menge  $C \subseteq \mathcal{F}$  wird von einer Folge  $\{h_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  von Funktionen in  $C$  *überdeckt*, wenn für alle  $i \in \mathbb{N}$  gilt  $h_i \leq h_{i+1}$  und wenn es zu jedem  $g \in C$  ein  $i \in \mathbb{N}$  gibt mit  $g \leq h_i$ . Wir sagen:  $C$  hat eine *abzählbare Überdeckung*.

Es gilt folgender Satz :

**Satz 3.16** Sei  $R = (H, V)$  ein schwaches average-case Modell, sei  $C \subseteq \mathcal{F}$  bezüglich  $\leq$  abgeschlossen und besitze  $C$  eine abzählbare Überdeckung. Wenn es ein  $\omega \in \Omega_R$  gibt, so daß für alle  $g \in C \cap H$  ein  $g' \in C$  existiert, das  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert, so ist  $C$  stabil bezüglich  $R$ .

Wir beweisen zunächst folgendes Lemma:

**Lemma 3.17** Mit den Voraussetzungen des obigen Satzes gilt: Sei  $f \in \mathcal{F} \setminus C$ . Gegeben eine unendliche Menge  $S \subseteq \Sigma^*$  derart, daß für kein  $g \in C$  gilt:  $f \leq_S g$ . Dann gibt es eine unendliche Dichte  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$  mit  $SUP(\mu) \subseteq S$  und  $f \notin C_\mu^R$ .

**Beweis:** Sei  $\{h_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine Überdeckung von  $C$ .

Gibt es also kein  $g \in C$  mit  $f \leq_S g$ , so gibt es insbesondere zu allen  $h_i$  eine unendliche Menge  $X_i \subseteq S$ , so daß für alle  $x \in X_i$  gilt  $f(x) > h_i(x)$ .

Da für alle  $i \in \mathbb{N}$  gilt  $h_i < h_{i+1}$ , gibt es eine Folge  $\{n_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ , so daß für alle  $x \in \Sigma^*$  mit  $|x| > n_i$  gilt  $h_{i+1}(x) > h_i(x)$ .

Wählt man nun für alle  $i \in \mathbb{N}$  nacheinander aus  $X_i$  ein Element  $x_i$  aus, das zuvor noch nicht ausgewählt wurde und  $|x_i| > n_i$  erfüllt, so erhält man eine unendliche Menge  $X \subseteq S$ , so daß für alle  $i \in \mathbb{N}$  und fast alle  $x \in X$  gilt  $h_i(x) < f(x)$ .

Setzt man

$$\mu(x) = c \cdot \omega(|x|) \cdot \begin{cases} 0 & \text{für } x \notin X, \\ \frac{1}{|X \cap \Sigma^{|x|}|} & \text{für } x \in X, \end{cases}$$

wobei  $c$  die Normierungskonstante ist, so ist  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$  und es gilt  $SUP(\mu) \subseteq S$ .

Für alle  $g \in C \cap H$  gibt es nach Voraussetzung ein  $g' \in C$ , das  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert. Daher gibt es ein  $j \in \mathbb{N}$ , so daß

$$g \leq_X g' \leq_X h_j \leq_X f$$

und

$$g' \not\leq_\mu^R g$$

gilt. Folglich gilt

$$g' \leq_{SUP(\mu)} f.$$

Nach Lemma 2.24 folgt daraus

$$f \not\leq_\mu^R g.$$

Da dies, wie oben gesagt, für alle  $g \in C \cap H$  gilt, folgt

$$f \notin C_\mu^R.$$

Daraus folgt die Behauptung. ■

Wir kommen zum Beweis des Satzes 3.16:

**Beweis von Satz 3.16:** Ist  $f \notin C$ , so gibt es kein  $g \in C$  mit  $f \leq g$ , da  $C$  bezüglich  $\leq$  abgeschlossen ist. Wählt man daher  $S = \Sigma^*$  in Lemma 3.17, so folgt die Behauptung des Satzes. ■

Wir geben nun Beispiele für schwache average-case Modelle und Mengen  $C \subseteq \mathcal{F}$  an, die die Voraussetzungen des Satzes 3.16 erfüllen.

In der klassischen Komplexitätstheorie spielen insbesondere die Mengen *Log*, *Pol*, *Exp*, die wir im Abschnitt 3.3 definiert haben, eine besondere Rolle. Diese sind offenbar bezüglich  $\leq$  abgeschlossen und besitzen eine abzählbare Überdeckung. Darüber hinaus sind diese Mengen nach Lemma 3.13 *P*-abgeschlossen.

Sei  $C \subseteq \mathcal{F}$  eine *P*-abgeschlossene Menge, und sei das erweiterte Levinsche Modell  $\mathcal{L} = (H, V)$  gegeben. Gemäß Korollar 2.34 gilt für alle  $g \in H$  und alle  $\omega \in \Omega_{\mathcal{L}}$ , daß

$$\tilde{g}(x) = \hat{g} \left( \lceil |x| \cdot \max_{m \leq |x|} \{1, \omega(m)\}^{-1} \rceil \right)$$

die Funktion  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert. Da zum Beispiel  $\omega(n) = \frac{6}{\pi^2} \cdot \frac{1}{n^2} \in \Omega_{\mathcal{L}}$  gilt, gilt für alle  $g \in H \cap C$  somit  $\tilde{g} \in H \cap C$ . Daher sind alle Voraussetzungen des obigen Satzes und Lemmas für  $R = \mathcal{L}$  und  $C \in \{\text{Log}, \text{Pol}, \text{Exp}\}$  erfüllt.

Analog zeigt man für  $C \in \{\text{Log}, \text{Pol}, \text{Exp}\}$  und die schwachen average-case Modelle  $\mathcal{S}, \mathcal{MS}, \mathcal{FU}, \mathcal{Z}$ , daß die Voraussetzungen des obigen Satzes erfüllt sind. Es ergibt sich der folgende Satz:

**Satz 3.18** *Ist  $R \in \{\mathcal{L}, \mathcal{S}, \mathcal{MS}, \mathcal{FU}, \mathcal{Z}\}$  und  $C \in \{\text{Log}, \text{Pol}, \text{Exp}\}$ , so ist  $C$  stabil bezüglich  $R$ .*

### 3.5 Das verwendete Turingmaschinen-Modell

In diesem Abschnitt erläutern wir das Turingmaschinen-Modell, das wir unseren Ergebnissen zugrunde legen. Dabei stützen wir uns auf das Buch von John E. Hopcroft und Jeffrey D. Ullman [9].

Wir gehen im folgenden von deterministischen bzw. nichtdeterministischen Turingmaschinen mit einem read-only Eingabeband und beliebig vielen Berechnungsbändern aus. Alle Bänder sind einseitig unendlich. Der Bandkopf auf dem Eingabeband wird nur auf den mit der Eingabe beschriebenen Bandfeldern und den ersten daran anschließenden Feldern bewegt. (Dieses Modell wird auch *off-line* Modell genannt.) Eine *Berechnung* einer deterministischen bzw. nichtdeterministischen Turingmaschine bei Eingabe  $x$  ist eine endliche Folge von Konfigurationen der Maschine, wobei die erste Konfiguration die Startkonfiguration der Maschine bei Eingabe  $x$  und die letzte Konfiguration eine Haltekonfiguration ist. In einem Übergang darf auf allen Bändern der Maschine parallel eine Schreibe- oder Bewegungsaktion stattfinden.

Seien  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$ ,  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$  Funktionen und  $S, T \subseteq \{f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0\}$  Mengen von Funktionen.

Eine deterministische Turingmaschine  $M$  mit einem read-only Eingabeband und beliebig vielen Arbeitsbändern hat *Platzkomplexität*  $s$  und heißt *s-platzbeschränkt*, wenn  $M$  für jede Eingabe  $x$  höchstens  $s(x)$  Felder auf jedem ihrer Arbeitsbänder benutzt.

Macht  $M$  bei jeder Eingabe  $x$  höchstens  $t(x)$  Übergänge, bis sie den Haltezustand erreicht, so hat  $M$  *Zeitkomplexität*  $t$ . Wir sagen auch, daß  $M$  eine  *$t$ -zeitbeschränkte Turingmaschine* ist.

Wie es in der Literatur üblich ist, gehen wir davon aus, daß für Platzkomplexitätsmaße  $s$  immer  $s(x) \geq 1$  und für Zeitkomplexitätsmaße  $t$  immer  $t(x) \geq |x| + 1$  für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt.

Eine nichtdeterministische Turingmaschine ist von der *Zeitkomplexität*  $t$ , wenn für alle  $x \in \Sigma^*$  die Länge jeder möglichen Konfigurationenfolge der Maschine bei Eingabe  $x$  durch  $t(x)$  beschränkt ist. Sie hat *Platzkomplexität*  $s$ , wenn für alle  $x \in \Sigma^*$  in jeder der möglichen Konfigurationenfolgen bei Eingabe  $x$  die Zahl der benutzten Bandfelder auf jedem Arbeitsband durch  $s(x)$  beschränkt ist.

Eine deterministische (bzw. nichtdeterministische) Turingmaschine  $M$  ist von *Zeitkomplexität*  $T$  (bzw. *Platzkomplexität*  $S$ ), wenn es ein  $t \in T$  (bzw. ein  $s \in S$ ) gibt, so daß  $M$  von Zeitkomplexität  $t$  (bzw. Platzkomplexität  $s$ ) ist. Wir sagen auch, daß  $M$  eine  *$T$ -Zeit* (bzw.  *$S$ -Platz*) Turingmaschine ist.

Ausgabe einer deterministischen Turingmaschine  $M$  bei Eingabe  $x$  ist der Inhalt ihres ersten Arbeitsbandes, nachdem die Turingmaschine den Haltezustand erreicht hat. Wir bezeichnen mit  $M(x)$  die Ausgabe von  $M$  bei Eingabe  $x$ .

Eine deterministische Turingmaschine  $M$  *akzeptiert* eine Eingabe  $x$  genau dann, wenn  $M(x) = 1$  gilt.

Eine nichtdeterministische Turingmaschine  $M$  *akzeptiert* eine Eingabe  $x$ , wenn es bei Eingabe von  $x$  wenigstens eine Berechnung gibt, so daß im Haltezustand der Wert 1 auf dem ersten Arbeitsband und dahinter der Bandkopf steht.

Ist  $M$  eine deterministische oder nichtdeterministische Turingmaschine, so ist  $L(M)$  die Menge aller akzeptierten Eingaben  $x \in \Sigma^*$ .

Eine Sprache  $L$  wird von einer deterministischen bzw. einer nichtdeterministischen Turingmaschine  $M$  *akzeptiert*, wenn  $L = L(M)$  gilt. Hat  $M$  Zeitkomplexität  $T$  bzw. Platzkomplexität  $S$  hat, so wird  $L$  *in Zeit  $T$*  bzw. *in Platz  $S$*  *akzeptiert*.

*berechnet*, wenn die Maschine bei Eingabe  $x$  einen endlichen Bitstring  $a_0a_1 \dots a_k$  ( $k \in \mathbb{N}_0$ ) ausgibt mit

$$f(x) = \sum_{i=0}^k 2^{-i} \cdot a_i.$$

Eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  heißt *unär berechenbar*, wenn es eine deterministische Turingmaschine  $M$  gibt, die für alle Eingaben  $x \in \Sigma^*$  die Ausgabe  $1^{f(x)}$  berechnet.

Die Funktion  $f$  wird *in Zeit  $t$*  und *in Platz  $s$*  *berechnet*, wenn es eine  $t$ -zeitbeschränkte und  $s$ -platzbeschränkte deterministische Turingmaschine  $M$  gibt, die  $f$  berechnet.

Ist  $t \in T$ , so sagen wir,  $f$  *wird in  $T$ -Zeit berechnet* oder  $f$  *wird in Zeit  $T$  berechnet*. Entsprechend heißt  $f$  *in  $S$ -Platz berechenbar* bzw. *in Platz  $S$  berechenbar*, falls  $s \in S$ .

Ist  $L \subseteq \Sigma^*$  und berechnet eine deterministische Turingmaschine  $M$  die sogenannte *charakteristische Funktion*  $\chi_L$  von  $L$ ,

$$\chi_L(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x \in L, \\ 0 & \text{falls } x \notin L, \end{cases}$$

so sagen wir,  $M$  *erkennt*  $L$ . Eine Sprache  $L$  heißt *rekursiv*, wenn es eine deterministische Turingmaschine gibt, die  $L$  erkennt.

## 3.6 Klassen von Dichten und Verteilungen

### 3.6.1 Berechenbare Dichten und Verteilungen

**Definition 3.19** Seien  $C_1, C_2 \subseteq \mathcal{F}$ . Die Klasse der in  $C_1$ -Zeit und  $C_2$ -Platz berechenbaren Dichten aus  $\mathcal{D}$  wird mit  $Dcomp(C_1, C_2)$  bezeichnet.

Ist  $C_1 = C_2 = \mathcal{F}$  so schreiben wir kurz  $Dcomp$  für die Klasse der (überhaupt) berechenbaren Dichten.

Für die Menge von Dichten, deren zugehörige Verteilung in  $C_1$ -Zeit und  $C_2$ -Platz berechenbar ist, führen wir die Menge  $Vcomp(C_1, C_2)$  ein.

Entsprechend ist  $Vcomp = Vcomp(\mathcal{F}, \mathcal{F})$ .

Es gilt das folgende Lemma:

**Lemma 3.20** Sei  $\phi$  eine lexikographische Aufzählung von  $\Sigma^*$ , so daß  $\phi$  in Zeit  $|x|^c$  mit  $c \geq 1$  bei Eingabe  $x \in \Sigma^*$  und  $\phi^{-1}$  in Zeit  $(\log_2(n+1))^c$  bei Eingabe  $n \in \mathbb{N}_0$  berechnet werden kann. Seien  $t$  und  $s$  längenwachsend, und sei  $\Delta$  eine Verteilung auf  $\Sigma^*$  bezüglich  $\phi$ . Gibt es eine deterministische Turingmaschine, die  $\Delta$  in Zeit  $t$  und in Platz  $s$  berechnet, so kann die zugehörige Dichte  $\Delta'$  in Zeit  $O(|\cdot|^c + t(\cdot))$  und in Platz  $O(|\cdot|^c + s(\cdot))$  berechnet werden.

**Beweis:** Berechne die deterministische Turingmaschine  $A$  die Verteilung  $\Delta$  in Zeit  $t$  und Platz  $s$ . Man verwendet die folgende Turingmaschine. Soll  $\Delta'(x)$  berechnet werden, so wird die Maschine  $A$  an Eingabe  $x$  und an Eingabe  $x \dot{+} (-1)$  gestartet. Dazu muß man zu  $x$  den Wert  $x \dot{+} (-1)$  berechnen. Dies geschieht mit Hilfe der deterministischen Turingmaschinen zum Berechnen von  $\phi$  und  $\phi^{-1}$ . Als Ergebnisse liefert  $A$  dann  $\Delta(x)$  und  $\Delta(x \dot{+} (-1))$ . Es ist aber  $\Delta'(x) = \Delta(x) - \Delta(x \dot{+} (-1))$ . Somit genügt es, die erhaltenen Ergebnisse zu subtrahieren. Daraus folgt die Behauptung. ■

Da im folgenden die in *Pol*-Zeit berechenbaren Verteilungen und Dichten eine große Rolle spielen werden, wobei *Pol* die in Gleichung (3.1) definierte Klasse der polynomiell beschränkten Funktionen ist, sagen wir auch kurz, daß die entsprechende Funktion *in polynomieller Zeit* (bzw. *in P-Zeit*) berechenbar ist, und formulieren folgendes Korollar:

**Korollar 3.21** *Ist eine Verteilung in polynomieller Zeit berechenbar, so ist auch die zugehörige Dichte in polynomieller Zeit berechenbar.*

Falls  $\mathcal{NP} \neq \mathcal{P}$  gilt, gilt die Umkehrung nicht, wie Y. Gurevich in [7] zeigt. Wir zitieren diesen Satz:

**Satz 3.22** *Falls  $\mathcal{NP} \neq \mathcal{P}$  gilt, gibt es eine in polynomieller Zeit berechenbare Dichte  $\gamma$ , so daß die zugehörige Verteilung  $\gamma^*$  nicht in polynomieller Zeit berechnet werden kann.*

### 3.6.2 Approximierbare Dichten und Verteilungen

Häufig genügt es, daß eine Dichte oder eine Verteilung bis auf eine vorgegebene Präzision in “vernünftiger” Zeit berechnet werden kann. Wir verwenden für eine solche Situation den Begriff der *Approximierbarkeit*. Es gibt Funktionen, die nicht berechnet, aber die approximiert werden können. Zum Beispiel gibt es keine deterministischen Turingmaschinen, die die Binärdarstellung der Werte von Funktionen  $f : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$  berechnen können, die nicht-rationale Funktionsergebnisse haben. Diese Funktionen können höchstens approximiert werden.

Eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$  wird von einer deterministischen Turingmaschine  $A$  in Zeit  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  und in Platz  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  *approximiert*, wenn die Maschine bei Eingabe von  $x01^k \in \Sigma^*$  nach höchstens  $t(x01^k)$  Schritten und mit einem Platzbedarf von höchstens  $s(x01^k)$  Bändeinheiten einen endlichen Bitstring  $a_0a_1 \dots a_k$  ( $k \in \mathbb{N}_0$ ) ausgibt mit

$$|f(x) - \text{bin}(a_0a_1 \dots a_k)| < 2^{-k}.$$

Ist  $C \subseteq \mathcal{F}$  und  $t \in C$ , so sagen wir,  $f$  ist in  $C$ -Zeit *approximierbar*. Entsprechend heißt  $f$  in  $C$ -Platz *approximierbar*, falls  $s \in C$ .

**Definition 3.23** *Seien  $C_1, C_2 \subseteq \mathcal{F}$ . Die Klasse der in  $C_1$ -Zeit und  $C_2$ -Platz approximierbaren Dichten aus  $\mathcal{D}$  wird mit  $D_{\text{approx}}(C_1, C_2)$  bezeichnet.*

*Ist  $C_1 = C_2 = \mathcal{F}$  so schreiben wir kurz  $D_{\text{approx}}$  für die Klasse der (überhaupt) approximierbaren Dichten.*

*Für die Menge von Dichten, deren zugehörige Verteilung in  $C_1$ -Zeit und  $C_2$ -Platz approximierbar ist, führen wir die Bezeichnung  $V_{\text{approx}}(C_1, C_2)$  ein.*

*Entsprechend ist  $V_{\text{approx}} = V_{\text{approx}}(\mathcal{F}, \mathcal{F})$ .*

**Lemma 3.24** *Sei  $\phi$  eine lexikographische Aufzählung von  $\Sigma^*$ , so daß  $\phi$  in Zeit  $|x|^c$  für ein  $c \geq 1$  bei Eingabe  $x \in \Sigma^*$  und  $\phi^{-1}$  in Zeit  $(\log_2(n+1))^c$  bei Eingabe  $n \in \mathbb{N}_0$  berechnet werden kann. Gelte für  $t, s : \Sigma^* \times \{0\} \times \{1\}^* \rightarrow \mathbb{N}$ , daß für alle  $k \geq 0$  die Funktionen  $\tilde{t}(x) = t(x01^k)$  und  $\tilde{s}(x) = s(x01^k)$ ,  $x \in \Sigma^*$ , längenwachsend sind. Sei  $\Delta$  eine in  $t$ -Zeit und  $s$ -Platz approximierbare Verteilung. Dann kann die zugehörige Dichte in Zeit*

$$t_1(x01^k) = O(|x|^c + t(x01^{k+1}))$$

bzw. in Platz

$$s_1(x01^k) = O(|x|^c + s(x01^{k+1}))$$

approximiert werden.

**Beweis:** Man beweist dieses Lemma ähnlich wie Lemma 3.20. Man approximiert mittels der Approximationsmaschine  $A$  für  $\Delta$  die Werte  $\Delta(x)$  und  $\Delta(x \dot{\vdash} (-1))$  auf  $k + 1$  Stellen genau. Dazu ist Zeit  $O(t(x01^{k+1}))$  und Platz  $O(s(x01^{k+1}))$  nötig. Die beiden Werte, die dabei von  $A$  berechnet werden, seien mit  $A(x, 1^{k+1})$  und  $A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1})$  bezeichnet. Dann gilt

$$\begin{aligned} |\Delta(x) - A(x, 1^{k+1})| &< 2^{-(k+1)}, \\ |\Delta(x \dot{\vdash} (-1)) - A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1})| &< 2^{-(k+1)}. \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} &|\Delta'(x) - (A(x, 1^{k+1}) - A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1}))| \\ = &|(\Delta(x) - \Delta(x \dot{\vdash} (-1))) - (A(x, 1^{k+1}) - A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1}))| \\ < &2 \cdot 2^{-(k+1)} \\ = &2^{-k}. \end{aligned}$$

Falls

$$A(x, 1^{k+1}) - A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1}) \geq 0$$

gilt, so wird dieser Wert als Approximationswert für  $\Delta'(x)$  ausgegeben, andernfalls wird 0 ausgegeben. Gilt

$$A(x, 1^{k+1}) - A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1}) < 0,$$

so ist

$$\begin{aligned} \Delta'(x) &\leq \Delta'(x) - (A(x, 1^{k+1}) - A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1})) \\ &= |\Delta'(x) - (A(x, 1^{k+1}) - A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1}))| \\ &< 2^{-k} \end{aligned}$$

und daher ist

$$|\Delta'(x) - 0| = \Delta'(x) < 2^{-k}.$$

Somit approximiert das angegebene Verfahren tatsächlich  $\Delta'$ . Die Laufzeit- und Platzkosten ergeben sich aus den Kosten zum Berechnen von  $x \dot{\vdash} (-1)$  und den Kosten zum Berechnen der Werte  $A(x, 1^{k+1})$  und  $A(x \dot{\vdash} (-1), 1^{k+1})$ . ■

Zwischen den in polynomieller Zeit approximierbaren Verteilungen und den in polynomieller Zeit berechenbaren Verteilungen besteht ein Zusammenhang, der in Lemma 3.25 formuliert wird. Ein ähnliches Resultat findet sich in [7]. Selbstverständlich läßt sich das folgende Lemma auch auf andere Zeit- und Platzklassen verallgemeinern.

**Lemma 3.25** *Sei  $\Psi$  eine in polynomieller Zeit approximierbare Verteilung auf  $\Sigma^*$  und sei  $t \in \mathbb{N}$ . Dann gibt es eine in polynomieller Zeit berechenbare Verteilung  $\Delta$  mit*

$$10 \cdot \Delta'(x) \geq \Psi'(x)$$

und

$$|5 \cdot \Delta'(x) - \Psi'(x)| \leq 3 \cdot 2^{-2 \cdot |x|^t}$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ .

**Beweis:** Die Beweisidee besteht darin, daß man  $\Delta$  aus  $\Psi$  konstruiert, indem man die Approximationsmaschine die Funktion  $\Psi$  auf hinreichend viele Stellen genau approximieren läßt.

Wir beweisen obigen Satz der Einfachheit halber nur für  $t = 1$ . Der allgemeine Beweis verläuft analog.

Die erste Idee aus einer approximierbaren Verteilung eine berechenbare zu konstruieren besteht darin, eine Genauigkeitsschranke  $k$  vorzugeben und die durch die Approximation auf  $k$  Stellen erhaltenen Werte als Werte einer P-Zeit berechenbaren Verteilung anzusehen. Leider sind diese Werte mit wachsendem  $x$  nicht notwendigerweise monoton wachsend und stellen daher in der Regel keine Verteilung dar. Wir müssen deshalb bei der Konstruktion von  $\Delta$  eine kompliziertere Strategie verfolgen.

Wir betrachten die folgende Funktion  $\mu : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$ ,

$$\mu(x) = (\Psi'(x) + 2^{-2 \cdot |x|+1}) \cdot \frac{1}{5}.$$

Dann gilt

$$0 < 5 \cdot \mu(x) - \Psi'(x) \leq 2^{-2 \cdot |x|+1}. \quad (3.2)$$

Man sieht leicht, daß

$$\sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) = \frac{1}{5} \cdot \left( \sum_{x \in \Sigma^*} \Psi'(x) + 2 \cdot \sum_{x \in \Sigma^*} 2^{-2 \cdot |x|} \right) = 1$$

gilt, daß also  $\mu$  eine Dichte ist. Weiter ist

$$\mu^*(x) = \frac{\Psi(x)}{5} + \frac{2}{5} \cdot \left( \left( \sum_{n < |x|} \frac{1}{2^n} \right) + \frac{|\{y \leq x : |y| = |x|\}|}{2^{2 \cdot |x|}} \right),$$

dabei bedeutet  $y \leq x$ , wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, daß  $y$  in der gegebenen wiederholungsfreien Aufzählung von  $\Sigma^*$  vor  $x$  steht oder  $x$  ist. Somit handelt es sich bei der Menge  $\{y \leq x : |y| = |x|\}$  um die Menge aller Strings mit  $|y| = |x|$ , die in der gegebenen wiederholungsfreien Aufzählung von  $\Sigma^*$  vor  $x$  auftreten. Man sieht leicht, daß sich somit  $\mu^*$  in polynomieller Zeit approximieren läßt.

Man beachte, daß

$$\mu(x) > \frac{2}{5} \cdot 2^{-2 \cdot |x|}$$

für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt.

Approximiere die deterministische Turingmaschine  $A$  die Verteilung  $\mu^*$  in polynomieller Zeit. Sei  $A(x, k)$  die Ausgabe der Maschine bei Eingabe  $x01^k$  als binärer Bruch interpretiert.

Wir setzen

$$\gamma(x) = A(x, 2 \cdot |x| + 5) - A(x \dot{\vdash} (-1), 2 \cdot |x \dot{\vdash} (-1)| + 5)$$

für  $x \neq \varepsilon$  und

$$\gamma(\varepsilon) = A(\varepsilon, 5).$$

Nach Definition der Approximation gilt

$$|A(x, 2 \cdot |x| + 5) - \mu^*(x)| < 2^{-(2|x|+5)}. \quad (3.3)$$

Daher folgt mit der Dreiecksungleichung für alle  $x \neq \varepsilon$

$$\begin{aligned} & |(A(x, 2 \cdot |x| + 5) - A(x \dot{\vdash} (-1), 2 \cdot |x \dot{\vdash} (-1)| + 5)) - (\mu^*(x) - \mu^*(x \dot{\vdash} (-1)))| \\ & \leq |A(x, 2 \cdot |x| + 5) - \mu^*(x)| + |A(x \dot{\vdash} (-1), 2 \cdot |x \dot{\vdash} (-1)| + 5) - \mu^*(x \dot{\vdash} (-1))| \\ & < 2^{-(2 \cdot |x| + 5)} + 2^{-(2 \cdot |x \dot{\vdash} (-1)| + 5)} \\ & \leq 5 \cdot 2^{-(2 \cdot |x| + 5)}. \end{aligned}$$

Also gilt für alle  $x \neq \varepsilon$

$$\begin{aligned} & |\gamma(x) - \mu(x)| \\ & = |(A(x, 2 \cdot |x| + 5) - A(x \dot{\vdash} (-1), 2 \cdot |x \dot{\vdash} (-1)| + 5)) - \mu(x)| \\ & \leq 5 \cdot 2^{-(2 \cdot |x| + 5)}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Für  $x = \varepsilon$  gilt diese Ungleichung ebenfalls, da  $\mu^*(\varepsilon) = \mu(\varepsilon)$  und  $\gamma(\varepsilon) = A(\varepsilon, 5)$  gilt. Da  $\mu(x) > \frac{2}{5} \cdot 2^{-2 \cdot |x|}$  gilt, folgt

$$\begin{aligned} \gamma(x) & \geq \mu(x) - 5 \cdot 2^{-(2 \cdot |x| + 5)} \\ & > \mu(x) - \frac{25}{64} \cdot \mu(x) \\ & > \frac{1}{2} \cdot \mu(x) \\ & > 0. \end{aligned}$$

Damit ist

$$\gamma(x) > \frac{1}{2} \cdot \mu(x) > \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5} \cdot \Psi'(x) = \frac{1}{10} \Psi'(x).$$

Weiter ist nach Ungleichung (3.3)

$$\begin{aligned} & \mu^*(y) - 2^{-(2 \cdot |y| + 5)} \\ & < A(y, 2 \cdot |y| + 5) = \sum_{x \leq y} \gamma(x) \\ & < \mu^*(y) + 2^{-(2 \cdot |y| + 5)}. \end{aligned}$$

Daher folgt mittels des Summen- und des Einschnürungssatzes der Analysis bei Folgen:

$$\begin{aligned}
& 1 \\
&= \lim_{y \rightarrow \infty} \left( \mu^*(y) - 2^{-(2 \cdot |y| + 5)} \right) \\
&\leq \lim_{y \rightarrow \infty} \sum_{x \leq y} \gamma(x) \\
&\leq \lim_{y \rightarrow \infty} \left( \mu^*(y) + 2^{-(2 \cdot |y| + 5)} \right) \\
&= 1.
\end{aligned}$$

Somit ist  $\gamma$  eine Dichte auf  $\Sigma^*$ , und weiter ist

$$\gamma^*(y) = A(y, 2 \cdot |y| + 5)$$

polynomiell berechenbar, und es gilt infolge der Ungleichungen (3.2) und (3.4)

$$|5 \cdot \gamma(x) - \Psi'(x)| \leq 2 \cdot 2^{-2 \cdot |x|} + 25 \cdot 2^{-(2 \cdot |x| + 5)} \leq 3 \cdot 2^{-2 \cdot |x|}.$$

Setzen wir  $\Delta = \gamma^*$ , so folgt die Behauptung des Satzes. ■

Der vorangegangene Satz findet Anwendung im Beweis des folgenden Satzes. Sei das betrachtete average-case Modell das erweiterte Levinsche Modell und  $f \in \mathcal{F}$  exponentiell beschränkt. Dann genügt es P-Zeit berechenbare Verteilungen zu untersuchen, wenn man den Untersuchungen ausschließlich P-Zeit approximierbare Verteilungen zugrunde legt. Ziel einer solchen Untersuchung könnte zum Beispiel die Frage sein, bezüglich welcher Dichten  $f$  im Mittel polynomiell ist.

**Satz 3.26** *Sei  $C \subseteq \mathcal{F}$  und gelte  $\max\{g, |\cdot|\}\} \in C$  für alle  $g \in C$ . Sei  $t \in \mathbb{N}$ ,  $E_t = \{f \in \mathcal{F} : f \leq 2^{|\cdot|^t}\}$ , und sei  $\Psi$  eine in P-Zeit approximierbare Verteilung auf  $\Sigma^*$ . Dann gibt es eine in P-Zeit berechenbare Verteilung  $\Delta$ , so daß*

$$C_{\Psi'}^{\mathcal{L}} \cap E_t = C_{\Delta}^{\mathcal{L}} \cap E_t$$

*gilt.*

**Beweis:** Nach Lemma 3.25 gibt es zu  $\Psi$  eine P-Zeit berechenbare Verteilung  $\Delta$  mit

$$|5 \cdot \Delta'(x) - \Psi'(x)| \leq 3 \cdot 2^{-2 \cdot |x|^t - |x|}. \quad (3.5)$$

Sei  $f \in C_{\Psi'}^{\mathcal{L}} \cap E_t$ , d.h. es gibt ein längenwachsendes  $g \in C$ , so daß

$$f \leq_{\Psi'}^{\mathcal{L}} g$$

und für fast alle  $x \in \Sigma^*$  gilt

$$f(x) \leq 2^{|x|^t}.$$

Dann ist

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \Psi'(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(f(x))}{|x|} < \infty.$$

Setze  $h = \max\{g, |\cdot|\}$ . Dann ist  $h$  längenwachsend und nach Voraussetzung gilt  $h \in P(C)$ . Da  $\mathcal{L}$  schwach transitiv ist, gilt

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \Psi'(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} < \infty.$$

Mittels Ungleichung (3.5) ergibt sich

$$\begin{aligned} & \sum_{x \in \Sigma^+} \Delta'(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ \leq & \sum_{x \in \Sigma^+} \frac{\Psi'(x) + 3 \cdot 2^{-2 \cdot |x|^t - |x|}}{5} \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ = & \frac{1}{5} \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} \Psi'(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} + \frac{3}{5} \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} 2^{-2 \cdot |x|^t - |x|} \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} \\ \leq & \frac{1}{5} \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} \Psi'(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} + \frac{3}{5} \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} 2^{-2 \cdot |x|^t - |x|} \cdot \frac{2^{|x|^t}}{|x|} \\ \leq & \frac{1}{5} \cdot \sum_{x \in \Sigma^+} \Psi'(x) \cdot \frac{\widehat{h}^{-1}(f(x))}{|x|} + \frac{3}{5} \cdot \sum_{n \in \mathbb{N}} 2^{-n^t} \cdot \frac{1}{n} \\ < & \infty. \end{aligned}$$

Somit ist

$$f \in C_{\Delta'}^{\mathcal{L}} \cap E_t.$$

Ebenso zeigt man, daß

$$C_{\Delta'}^{\mathcal{L}} \cap E_t \subseteq C_{\Psi'}^{\mathcal{L}} \cap E_t. \quad \blacksquare$$

Ein ähnlicher Satz mit sogar schwächeren Voraussetzungen läßt sich im PolySum2-Modell  $\mathcal{S}$  zeigen:

**Satz 3.27** *Sei  $C \subseteq \mathcal{F}$ , und sei  $\Psi$  eine in  $P$ -Zeit approximierbare Verteilung auf  $\Sigma^*$ . Dann gibt es eine in  $P$ -Zeit berechenbare Verteilung  $\Delta$ , so daß*

$$C_{\Psi'}^{\mathcal{S}} = C_{\Delta'}^{\mathcal{S}},$$

*gilt.*

**Beweis:** Zum Beweis dieses Satzes benutzen wir die Beobachtung, daß für alle  $t \in \mathbb{N}$  und alle Funktionen  $\delta : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$  mit

$$\delta(x) \leq 2^{-2 \cdot |x|}$$

gilt:

$$\sum_{x \in \Sigma^*} |x|^t \cdot \delta(x) < \infty.$$

Denn mit Lemma 3.25 folgt, daß es zu  $\Psi$  eine berechenbare Verteilung  $\Delta$  gibt mit

$$|5 \cdot \Delta'(x) - \Psi'(x)| \leq 3 \cdot 2^{-2 \cdot |x|^t}.$$

Daher hat die Funktion

$$\delta(x) = |5 \cdot \Delta'(x) - \Psi'(x)|$$

die obige Eigenschaft.

Ist z.B.  $f \in C_{\Psi}^{\mathcal{S}}$ , so gibt es ein  $g \in C$ , so daß für alle  $t \geq 1$  gilt:

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^t \cdot \Psi'(x) < \infty.$$

Daher gilt für alle  $t \geq 1$

$$\begin{aligned} & \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^t \cdot \Delta'(x) \\ & \leq \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^t \cdot \frac{1}{5} \cdot (\Psi'(x) + \delta(x)) \\ & = \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^t \cdot \frac{1}{5} \cdot \Psi'(x) + \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ f(x) > g(x)}} |x|^t \cdot \frac{1}{5} \cdot \delta(x) \\ & < \infty. \end{aligned}$$

Somit gilt  $f \in C_{\Delta'}^{\mathcal{S}}$ . Die Inklusion

$$C_{\Delta'}^{\mathcal{S}} \subseteq C_{\Psi}^{\mathcal{S}}$$

folgt analog. ■

Untersucht man, ob ein  $\mathcal{NP}$ -Problem in mittlerer P-Zeit bezüglich einer P-Zeit approximierbaren Verteilung  $\Psi$  zu lösen ist, so kann man sich im erweiterten Levinischen Modell und auch im PolySum2-Modell auf die Untersuchung dieser Frage bezüglich P-Zeit berechenbarer Verteilungen zurückziehen. Diese Aussage ergibt sich aus den letzten beiden Sätzen, wenn man  $C$  durch die Menge der Polynome  $Pol$  ersetzt und beachtet, daß alle  $\mathcal{NP}$ -Probleme in exponentieller deterministischer Zeit gelöst werden können, wie aus der klassischen Komplexitätstheorie bekannt ist.

Aus Lemma 3.25 läßt sich außerdem folgender Satz für das average-case Modell  $\mathcal{FU}$  folgern:

**Satz 3.28** *Sei  $C \subseteq \mathcal{F}$  und  $\Psi$  eine in P-Zeit approximierbare Verteilung, so gibt es eine in P-Zeit berechenbare Verteilung  $\Delta$ , so daß*

$$C_{\Delta'}^{\mathcal{FU}} \subseteq C_{\Psi'}^{\mathcal{FU}}$$

*gilt.*

### 3.6.3 Generierbare Dichten und Verteilungen

Man stellt sich üblicherweise die “Quelle” zur “zufälligen” Erzeugung von Strings in  $\Sigma^*$  als eine probabilistische Turingmaschine vor, die bei leerer Eingabe Strings mit einer bestimmten, von der Definition der Maschine abhängigen Wahrscheinlichkeit liefert. In diesem Zusammenhang hat sich das Modell der *Münzwurf-Maschine* durchgesetzt. Dabei handelt es sich um eine nichtdeterministische Turingmaschine, zu der es in jeder Konfiguration maximal zwei verschiedene Folgekonfigurationen gibt. Diese sind gleich wahrscheinlich. Jeder Konfigurationenfolge kann eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Die Wahrscheinlichkeit für jede Ausgabe ist die Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Konfigurationenfolgen, die bei fester Eingabe und damit fester Startkonfiguration zu dieser Ausgabe führen. Ist  $A$  eine solche Münzwurf-Maschine, so bezeichnen die Werte  $\pi_A(x, y)$  der Funktion

$$\pi_A : \Sigma^* \times (\Sigma^* \cup \{\infty\}) \rightarrow [0, 1]$$

die Wahrscheinlichkeit, daß  $A$  bei Eingabe  $x$  die Ausgabe  $y$  liefert. Diese Funktion heißt *Ausgabedichte* von  $A$ . Hierbei bedeutet  $y = \infty$ , daß  $A$  nicht anhält. Diese Funktion erfüllt

$$\sum_{y \in \Sigma^*} \pi_A(x, y) + \pi_A(x, \infty) = 1.$$

Daher sagt man, eine Münzwurf-Maschine  $A$  *generiert* die Dichte  $\pi_A(x, \cdot)$  bei Eingabe  $x$ .

Eine formale Theorie der sogenannten *probabilistischen Turingmaschinen* und der *Münzwurf-Maschinen*, die ein Spezialfall der probabilistischen Turingmaschinen sind, findet sich in [3].

#### Definition 3.29

1. Eine Dichte  $\gamma : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]$  wird von einer Münzwurf-Maschine  $A$  in Zeit  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  und Platz  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  generiert, wenn  $A$  bei Eingabe  $\varepsilon$  mit Ausgabe  $x$  nur dann hält, wenn sie höchstens  $t(x)$  Schritte gemacht und höchstens  $s(x)$  Bändeinheiten benutzt hat, und wenn  $\pi_A(\varepsilon, \cdot) = \gamma$  gilt, d.h. wenn die Ausgabedichte von  $A$  bei Eingabe  $\varepsilon$  die Dichte  $\gamma$  ist.
2. Ist  $C \subseteq \mathcal{F}$  und  $t \in C$ , so sagen wir,  $\gamma$  wird in  $C$ -Zeit generiert. Entsprechend heißt  $\gamma$  in  $C$ -Platz generierbar, falls  $s \in C$ .
3. Wir sagen, eine Verteilung  $\Delta$  wird in Zeit  $t$  und Platz  $s$  generiert, falls es eine Münzwurf-Maschine gibt, die die zugehörige Dichte  $\Delta'$  in Zeit  $t$  und Platz  $s$  generiert. Analog ergeben sich die Begriffe “ $\Delta$  wird in  $C$ -Zeit generiert” bzw. “in  $C$ -Platz” für  $C \subseteq \mathcal{F}$ .

**Definition 3.30** Seien  $C_1, C_2 \subseteq \mathcal{F}$ . Die Klasse der in  $C_1$ -Zeit und  $C_2$ -Platz generierbaren Dichten aus  $\mathcal{D}$  wird mit  $Dgen(C_1, C_2)$  bezeichnet.

Ist  $C_1 = C_2 = \mathcal{F}$ , so schreiben wir kurz  $Dgen$  für die Klasse der (überhaupt) generierbaren Dichten.

Für die Menge von Dichten, deren zugehörige Verteilung in  $C_1$ -Zeit und  $C_2$ -Platz generierbar ist, führen wir die Menge  $Vgen(C_1, C_2)$  ein.

Entsprechend ist  $Vgen = Vgen(\mathcal{F}, \mathcal{F})$ .

Es gilt der folgende Zusammenhang zwischen den berechenbaren und den generierbaren Verteilungen:

**Satz 3.31** Wird die Verteilung  $\Delta$  in  $P$ -Zeit berechnet, so kann sie in  $P$ -Zeit generiert werden.

Dieser Satz ergibt sich aus dem folgenden Lemma. Der Beweis des Satzes wurde bereits in sehr knapper Form in [1] skizziert. Wir geben für das folgende allgemeinere Lemma einen Beweis an.

**Lemma 3.32** Sei  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  eine längenwachsende Funktion, die in Zeit  $O(t)$  unär berechnet werden kann. Ist die Verteilung  $\Delta$  in Zeit  $t$  berechenbar, so kann sie in Zeit

$$O(|\cdot|^k \cdot t(\cdot) \cdot \hat{t}(2 \cdot |\cdot|))$$

für ein  $k \geq 1$  generiert werden.

**Beweis:** Werde die Verteilung  $\Delta$  von einer deterministischen Turingmaschine in Zeit  $t$  berechnet. Wir konstruieren eine Münzwurf-Maschine  $M$ , die  $\Delta$  in Zeit  $O(|\cdot|^k \cdot t(\cdot) \cdot \hat{t}(2 \cdot |\cdot|))$  generiert.

Seien

$$\begin{aligned} B_\varepsilon &= \{y \in \{0, 1\}^{t(\varepsilon)} : 0 \leq \text{bin}(y) \leq \Delta(\varepsilon)\}, \\ B_x &= \{y \in \{0, 1\}^{t(x)} : \Delta(x \dagger (-1)) < \text{bin}(y) \leq \Delta(x)\} \end{aligned}$$

für  $x \in \Sigma^+$  und sei  $B = \bigcup_{x \in \Sigma^*} B_x$ .

Dann ist

$$|B_x| = 2^{t(x)} \cdot \Delta'(x)$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ .

Findet man nun einen Algorithmus, der nur Bitstrings generiert, die in  $B$  liegen, und darüber hinaus diese Bitstrings  $y$  mit der Wahrscheinlichkeit  $2^{-|y|}$  liefert, so generiert er folgende Dichte

$$\tau(y) = \begin{cases} 0 & \text{falls } y \notin B, \\ \frac{1}{2^{|y|}} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Daher ist die Wahrscheinlichkeit für alle  $x \in \Sigma^*$ , daß dieser Algorithmus ein  $y \in B_x$  ausgibt, genau

$$|B_x| \cdot \frac{1}{2^{t(x)}} = \Delta'(x).$$

Findet man nun zu einem solchen  $y$  das zugehörige  $x$  und gibt dieses aus, so hat man einen Algorithmus zum Generieren von  $\Delta$ .

Wir geben einen Algorithmus an, der die oben genannten Eigenschaften hat und darüber hinaus gleich das gewünschte  $x$  ausgibt.

**Algorithmus 3.33**

<i>BEGIN</i>		(1)
<i>Ende = false; y = ε;</i>		(2)
<i>WHILE Ende = false</i>		(3)
<i>Wähle per Münzwurf ein Bit b zufällig;</i>		(4)
<i>y = y ◦ b, wobei ◦ die Konkatenation ist;</i>		(5)
<i>Suche mit Hilfe des binären Suchverfahrens ein <math>x \in \Sigma^*</math> derart, daß</i>		(6)
<i><math>\Delta(x \dot{+} (-1)) &lt; \text{bin}(y) \leq \Delta(x)</math> gilt bzw. <math>0 \leq \text{bin}(y) \leq \Delta(\varepsilon)</math>;</i>		
<i>IF <math> y  \geq t(x)</math></i>		(7)
<i>THEN</i>	<i>Ende = true;</i>	(8)
	<i>Gib x aus.</i>	(9)
<i>END</i>		(10)

Wenn der Algorithmus  $z$  ausgibt, dann hat er genau  $t(z)$  Schleifendurchläufe vollzogen. Man überlegt sich nämlich leicht, daß in jedem Schritt  $y$  genau um ein Bit wächst. Seien  $y_i$  und  $x_i$  die Belegungen der Variablen  $y$  und  $x$  im  $i$ -ten Schleifendurchlauf für  $0 \leq i \leq t(z)$ . Gilt für ein  $i$ , daß  $|y_i| < t(x_i)$ , so folgt

$$|y_{i+1}| = |y_i| + 1 \leq t(x_i) \leq t(x_{i+1}),$$

da  $t$  längenwachsend ist. Somit hält der Algorithmus, wenn  $|y_i| = t(x_i)$  gilt, dazu sind  $t(z)$  Schleifendurchläufe nötig.

Wenn der Algorithmus mit Ausgabe  $z$  hält, gilt  $y_{t(z)} \in B_z$ . Daher gilt für das letzte berechnete  $y$ , daß  $y \in B$  erfüllt ist. Da in jedem Schleifendurchlauf ein weiteres Bit gleichverteilt gewählt wird, ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß der Algorithmus ein bestimmtes  $y \in B$  liefert, gleich  $2^{-|y|}$ . Somit hat dieser Algorithmus die oben genannten Eigenschaften und generiert damit  $\Delta$ .

Es bleibt die binäre Suche zu erläutern, die in Schritt (6) durchgeführt wird, und ebenso bleibt zu zeigen, daß der Algorithmus die gewünschte Laufzeit hat.

Sei also  $y$  ein Bitstring, und das eindeutige  $x \in \Sigma^*$  sei gesucht, das

$$\Delta(x \dot{+} (-1)) < \text{bin}(y) \leq \Delta(x)$$

bzw.

$$0 \leq \text{bin}(y) \leq \Delta(\varepsilon)$$

erfüllt. Sei  $x_j$  der String, der bezüglich der zugrunde liegenden lexikographischen Ordnung die Nummer  $2^j$  hat. Zunächst untersucht man mit wachsendem  $j$ , ob

$$\text{bin}(y) \leq \Delta(x_j)$$

gilt. Sobald man das erste  $j$  mit dieser Eigenschaft gefunden hat, sucht man binär im Bereich  $]x_{j-1}, x_j]$ , d.h. nach dem gleichen Prinzip wie zuvor. Sicher ist die Nummer von  $x$  bezüglich der lexikographischen Ordnung mindestens  $\frac{1}{2} \cdot j$ , für dieses kleinste  $j$ . Somit ruft man den Berechnungsalgorithmus für  $\Delta$  nur mit Eingaben  $x'$  auf, die  $|x'| \leq 2 \cdot |x|$  erfüllen. Insgesamt ruft man den Berechnungsalgorithmus  $O(|x|)$  oft auf, wobei jeweils maximal  $\widehat{t}(2 \cdot |x|)$  Schritte nötig sind. Daraus ergibt sich eine Gesamtlaufzeit zur Berechnung der unterschiedlichen  $\Delta$ -Werte von  $O(|x| \cdot \widehat{t}(2 \cdot |x|))$  Schritten. Dazu kommt noch die polynomielle Laufzeit beim Berechnen der Strings zu den vorgegebenen Nummern. Diese hängt von der zugrunde gelegten lexikographischen Ordnung ab. Also beträgt die Gesamtlaufzeit der Suche  $O(|x|^c \cdot \widehat{t}(2 \cdot |x|))$  für ein  $c \geq 1$ .

Da der Algorithmus zum Generieren  $t(x)$  Schleifendurchläufe benötigt und in jedem Durchlauf eine Suche erfolgt, ist seine Laufzeit durch

$$O(|x|^c \cdot t(x) \cdot \widehat{t}(2 \cdot |x|))$$

beschränkt. ■

Aus dem obigen Satz ergibt sich die folgende Charakterisierung der in  $C$ -Zeit generierbaren Verteilungen. Gelegentlich wird statt der obigen Definition für generierbare Dichten auch eine Definition verwendet, die der Charakterisierung von Lemma 3.35 entspricht.

Dazu benötigen wir zunächst den Begriff der *induzierten Dichte*.

**Definition 3.34** Sei  $h : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  und  $\mu \in \mathcal{D}$ , so bezeichnet  $\mu_h$  die Dichte

$$\mu_h(x) = \sum_{\substack{y \in \Sigma^* \\ h(y)=x}} \mu(y),$$

die durch  $h$  über  $\mu$  induzierte Dichte.

Sei nun  $C \subseteq \mathcal{F}$  eine unter  $\leq$  abgeschlossene Menge von Funktionen, für die gilt:

1. Für alle  $f, g \in C$  gilt  $f + g \in C$ .
2. Für alle  $g \in C$  gibt es eine längenwachsende Funktion  $h \in C$  mit  $g \leq h$  und

$$|\cdot|^c \cdot h(\cdot) \cdot \widehat{h}(2 \cdot |\cdot|) \in C.$$

**Lemma 3.35**

1. Wenn es eine in  $C$ -Zeit berechenbare Funktion  $h : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  mit  $|h(x)| \geq |x|$  für alle  $x \in \Sigma^*$  und eine in  $C$ -Zeit berechenbare Verteilung  $\Gamma$  gibt mit  $\Gamma'_h = \mu$ , dann ist die Dichte  $\mu$  in  $C$ -Zeit generierbar.
2. Ist dagegen  $\mu$  in  $C$ -Zeit generierbar, so gibt es eine in  $C$ -Zeit berechenbare Funktion  $h : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  und eine Dichte  $\gamma$  mit  $\gamma_h = \mu$ , für die gilt:

$$\gamma(x) \in \left\{ 0, \frac{1}{2^{|x|}} \right\}$$

für alle  $x \in \Sigma^* = \{0, 1\}^*$ .

**Beweis:**

*Beweis der ersten Behauptung des Lemmas:*

Werde  $h$  von der deterministischen Turingmaschine  $M$  in Zeit  $g \in C$  berechnet und berechne  $T$  die Verteilung  $\Gamma$  in Zeit  $t \in C$ . Nach dem vorangehenden Lemma 3.32 gibt es dann eine Münzwurf-Maschine  $T'$ , die  $\Gamma'$  in Zeit  $O(|x|^k \cdot t(x) \cdot \hat{t}(2 \cdot |x|))$  generiert. O.B.d.A. seien  $g$  und  $t$  längenwachsend und erfülle  $g$

$$|\cdot|^c \cdot g(\cdot) \cdot \hat{g}(2 \cdot |\cdot|) \in C.$$

Durch Hintereinanderschalten der Maschine  $M$  hinter  $T'$  ergibt sich eine Münzwurfmaschine, die  $\Gamma'_h = \mu$  generiert. Ist die Ausgabe dieser Münzwurf-Maschine  $y$ , so gibt es ein  $x$  mit  $h(x) = y$ . Damit ist  $|x| \leq |y|$ . Die Laufzeit ergibt sich infolge der Eigenschaften von  $C$  dabei zu

$$O(|x|^k \cdot t(x) \cdot \hat{t}(2 \cdot |x|)) + g(x) \leq O(|y|^k \cdot t(y) \cdot \hat{t}(2 \cdot |y|)) + g(y) \subseteq C.$$

Daraus folgt die Behauptung.

*Beweis der zweiten Behauptung des Lemmas:*

Eine Münzwurf-Maschine  $M$  arbeitet im wesentlichen wie eine deterministische Turingmaschine bis auf die Konfigurationen, in denen zwei Folgekonfigurationen möglich sind. Wir nennen diese im folgenden *Münzwurf-Konfigurationen*. Betrachtet man eine Berechnung der Münzwurf-Maschine bei Eingabe  $\varepsilon$  und ordnet man dieser Berechnung eine Folge aus  $\{0, 1\}^*$  zu, die kodiert, welche Folgekonfigurationen in den Münzwurf-Konfigurationen gewählt wurde, so läßt sich anhand dieses Bitstrings und der Beschreibung der Münzwurf-Maschine die gesamte Berechnung rekonstruieren. Offensichtlich sind in der Regel nicht alle Bitstrings Beschreibungen einer Berechnung einer gegebenen Münzwurf-Maschine, und nach Definition der Münzwurf-Maschinen ist die Wahrscheinlichkeit, mit der diese Maschine die zu einem gegebenen Bitstring  $b$  gehörige Berechnung ausführt,

$$\gamma(b) = \begin{cases} \frac{1}{2^{|b|}} & \text{falls } b \text{ einer Berechnung entspricht,} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Sei  $B_M \subseteq \{0, 1\}^*$  die Menge der Bitstring, die einer Berechnung von  $M$  entsprechen. Ist  $\mu$  in  $C$ -Zeit generierbar, dann gibt es eine Münzwurf-Maschine  $M$  und eine Funktion  $g \in C$ , so daß  $M$  die Dichte  $\mu$  in Zeit  $g$  generiert, d.h.  $\pi_M(\varepsilon, x) = \mu(x)$  für alle  $x \in \Sigma^*$ . Zu  $M$  konstruieren wir die folgende deterministische Turingmaschine  $\tilde{M}$ : Als Eingabe erhält  $\tilde{M}$  einen endlichen Bitstring  $b$ . Die Turingmaschine arbeitet analog zu  $M$  mit dem Unterschied, daß sie stets dann ein Zeichen der Eingabe liest und den Lesekopf ein Zeichen weiter nach rechts bewegt, wenn bei der Simulation von  $M$  eine Münzwurf-Konfiguration auftritt. Dann wird gemäß dem gelesenen Bit der Eingabe eine der beiden möglichen Folgekonfigurationen von  $M$  durch  $\tilde{M}$  gewählt. Parallel zu der Simulation, protokolliert  $\tilde{M}$  die Zahl der gemachten Übergänge auf einem weiteren Arbeitsband. Ist  $b \in B_M$ , so führt  $\tilde{M}$  genau die Berechnung durch, die zu  $b$  bezüglich  $M$  gehört. Ist der Bitstring der Eingabe zu kurz, d.h. gerät  $\tilde{M}$  bei der Simulation in eine Münzwurf-Konfiguration und der Bandkopf des Eingabebandes steht hinter der Eingabe, so bricht die Maschine ab und kopiert den Inhalt des Protokollbandes auf ihr erstes Arbeitsband, d.h. in diesem Fall ist die Ausgabe bis auf eine multiplikative Konstante so lang, wie die Berechnungszeit. Offenbar berechnet somit die deterministische Turingmaschine  $\tilde{M}$  eine Funktion  $h : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  mit  $\Sigma = \{0, 1\}$ . Nach Konstruktion und den Eigenschaften von  $C$  ist  $h$  in  $C$ -Zeit berechenbar. Weiterhin ist die Ausgabeverteilung von  $\tilde{M}$  bei Eingabeverteilung  $\gamma$  genau

$$\gamma_h(\cdot) = \pi_M(\varepsilon, \cdot) = \mu(\cdot).$$

Daraus ergibt sich die zweite Aussage des obigen Lemmas. ■

### 3.7 Sprachklassen

#### Definition 3.36

1. Sei  $L \subseteq \Sigma^*$ ,  $\gamma \in \mathcal{D}$ ,  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$  (bzw.  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$ ),  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell und  $C \subseteq \mathcal{F}$ . Gibt es ein  $k > 0$  und eine  $t$ -zeitbeschränkte (bzw.  $s$ -platzbeschränkte) deterministische bzw. nichtdeterministische  $k$ -Band Turingmaschine  $A$ , so daß  $t \in C_\gamma^R$  (bzw.  $s \in C_\gamma^R$ ) gilt, so akzeptiert  $A$  die Sprache  $L$  in mittlerer  $C$ -Zeit (bzw.  $C$ -Platz) bezüglich  $\gamma$  und  $R$ .
2. Ist  $R = (H, V)$  ein Vergleichsmodell,  $C \subseteq \mathcal{F}$  und  $D \subseteq \mathcal{D}$ , so bezeichnet  $DTime_D^R(C)$  die Menge aller Sprachen  $L$  dergestalt, daß es zu jedem  $\gamma \in D$  ein  $k > 0$  und eine deterministische  $k$ -Band Turingmaschine gibt, die  $L$  in mittlerer  $C$ -Zeit bezüglich  $\gamma$  und  $R$  akzeptiert.  
Analog sind  $NTime_D^R(C)$ ,  $Dspace_D^R(C)$  und  $Nspace_D^R(C)$  definiert.

Ist  $D = \{\gamma\}$  einelementig, so schreiben wir statt  $DTime_{\{\gamma\}}^R(C)$  auch kurz

$$DTime_\gamma^R(C).$$

Analog schreiben wir

$$NTime_\gamma^R(C), Dspace_\gamma^R(C), Nspace_\gamma^R(C).$$

Mit  $DTime(C)$ ,  $NTime(C)$ ,  $DSpace(C)$  und  $NSpace(C)$  bezeichnen wir die bekannten worst-case Sprachklassen, d.h. zum Beispiel ist  $DTime(C)$  die Menge aller Sprachen  $L$ , für die es eine deterministische Turingmaschine  $M$  mit Laufzeit  $t \in C$  und  $L = L(M)$  gibt. Weiter benutzen wir folgende abkürzende Schreibweisen:

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= DTime(Pol) \\ \mathcal{NP} &= NTime(Pol) \\ DExpTime &= DTime\left(2^{O(|x|)}\right), \\ NExpTime &= NTime\left(2^{O(|x|)}\right), \\ PSpace &= DSpace(Pol), \end{aligned}$$

dabei ist  $Pol$  die in Gleichung (3.1) definierte Menge der Polynomfunktionen.

Offenbar gilt infolge der Verträglichkeit mit  $\leq$  bei schwachen average-case Modellen der folgende Satz:

**Satz 3.37** Sei  $R = (H, V)$  ein schwaches average-case Modell,  $D_1, D_2 \subseteq \mathcal{D}$  mit  $D_1 \subseteq D_2$  und  $C \subseteq \mathcal{F}$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} DTime(C) &\subseteq DTime_{D_2}^R(C) \subseteq DTime_{D_1}^R(C), \\ NTime(C) &\subseteq NTime_{D_2}^R(C) \subseteq NTime_{D_1}^R(C), \\ DSpace(C) &\subseteq DSpace_{D_2}^R(C) \subseteq DSpace_{D_1}^R(C), \\ NSpace(C) &\subseteq NSpace_{D_2}^R(C) \subseteq NSpace_{D_1}^R(C). \end{aligned}$$

## Kapitel 4

# Komplexitätstheorie

In diesem Kapitel zeigen wir eine Reihe wichtiger komplexitätstheoretischer Resultate, die sich ergeben, wenn man den Überlegungen ein schwaches average-case Modell zugrunde legt.

Eine Reihe bekannter Resultate aus der worst-case Komplexitätstheorie lassen sich ohne weitere Voraussetzungen übertragen.

Wir gehen in den folgenden Abschnitten stets von einem schwachen average-case Modell  $R$  aus.

### 4.1 Bekanntes aus der klassischen Komplexitätstheorie

Wir zitieren in diesem Abschnitt bekannte Sätze aus der klassischen Komplexitätstheorie, die wir in den folgenden Abschnitten zum Beweis einiger Aussagen benutzen werden.

Da die Anzahl der Zustände und das Bandalphabet einer Turingmaschine beliebig groß sein können, kann der zum Akzeptieren einer Sprache benötigte Speicher immer um einen konstanten Faktor komprimiert werden, indem verschiedene Bandsymbole zu einem Symbol kodiert werden. Eine ähnliche Aussage gilt auch für die Laufzeit. Daher können konstante Faktoren in den Laufzeit- und Platzschranken ignoriert werden. Dies wird in den folgenden Sätzen präzisiert.

Seien im folgenden  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  und  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$ .

**Satz 4.1 (Bandkompression)** *Sei  $L \in \Sigma^*$ . Wird  $L$  von einer  $s$ -platzbeschränkten Turingmaschine mit  $k$  Arbeitsbändern akzeptiert, so gilt für jedes  $c > 0$ , daß es eine Turingmaschine  $M$  mit  $k$  Arbeitsbändern gibt, die  $L$  in Platz  $\max(1, \lceil c \cdot s(\cdot) \rceil)$  akzeptiert.*

**Satz 4.2 (Bandreduktion)**

1. Wird  $L$  von einer  $s$ -bandbeschränkten Turingmaschine mit  $k \geq 1$  Arbeitsbändern akzeptiert, so gibt es eine Turingmaschine mit nur einem Arbeitsband, die  $L$  in Platz  $s$  akzeptiert.
2. Wird  $L$  von einer  $k$ -Band Turingmaschine mit  $k \geq 1$  in Zeit  $t$  akzeptiert, so gibt es eine Turingmaschine mit nur einem Arbeitsband, die  $L$  in Zeit  $t^2$  akzeptiert.

Die Beweise zu den letzten beiden Sätzen findet man in [9].

Gemäß [12] gilt der folgende Satz:

**Satz 4.3 (Lineare Beschleunigung)** Sei  $\varepsilon > 0$ ,  $k \geq 1$ . Wenn  $L$  von einer Turingmaschine  $M_1$  mit  $k$  Arbeitsbändern in Zeit  $t$  akzeptiert wird, so gibt es eine Turingmaschine  $M_2$  mit  $(k + 1)$  Arbeitsbändern, die  $L$  in Zeit  $t'$  akzeptiert, wobei für fast alle  $x \in \Sigma^*$

$$t'(x) \leq \begin{cases} |x| + \varepsilon \cdot t(x) & \text{falls } t \leq k \cdot |\cdot| \text{ für ein } k \in \mathbb{N}, \\ \varepsilon \cdot t(x) & \text{sonst} \end{cases}$$

gilt.

**Definition 4.4** Eine Funktion  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  heißt voll bandkonstruierbar, wenn es ein  $k > 0$  und eine deterministische  $k$ -Band Turingmaschine gibt, die bei allen Eingaben  $x \in \Sigma^*$  auf dem ersten Arbeitsband genau  $s(x)$  Bändeinheiten benutzt.

Eine Funktion  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  heißt voll zeitkonstruierbar, wenn es ein  $k > 0$  und eine deterministische  $k$ -Band Turingmaschine gibt, die bei allen Eingaben  $x \in \Sigma^*$  genau  $t(x)$  Schritte macht.

Nach [9] gilt der folgende Zeithierarchiesatz:

**Satz 4.5** Ist  $t_1 : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  eine Funktion, ist  $t_2 : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  eine voll zeitkonstruierbare Funktion und gilt

$$\liminf_{|x| \rightarrow \infty} \frac{t_1(x) \cdot \log(t_1(x))}{t_2(x)} = 0,$$

dann gibt es eine Sprache  $L$ , die von einer deterministischen Turingmaschine in Zeit  $t_2$  akzeptiert wird, die aber von keiner deterministischen Turingmaschine in Zeit  $t_1$  akzeptiert werden kann.

## 4.2 Hierarchiesätze

### 4.2.1 Exkurs in die Theorie der Complexity Cores

Wir benötigen zum Beweis von Hierarchiesätzen Ergebnisse aus der Theorie der allgemeinen Complexity Cores. Aus diesem Grund werden wir die dabei verwendeten Begriffe und Resultate hier einführen. Wir folgen dabei den Ausführungen in [5]. Man beachte, daß in der Literatur häufig der Begriff *Hard Core* anstelle von *Complexity Core* verwendet wird.

**Definition 4.6** Sei  $\mathcal{C}$  eine Klasse von Sprachen in  $\Sigma^*$ . Für alle Sprachen  $L \subseteq \Sigma^*$  sei

$$\mathcal{C}_L = \{C \in \mathcal{C} : C \subseteq L\}.$$

Eine unendliche Menge  $\mathcal{H} \subseteq \Sigma^*$  heißt Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , wenn für alle  $C \in \mathcal{C}_L$  gilt:

$$|C \cap \mathcal{H}| < \infty.$$

Falls ferner  $\mathcal{H} \subseteq L$  gilt, ist  $\mathcal{H}$  ein echtes Complexity Core.

Wir erläutern zuerst die Bedeutung der Complexity Core Theorie an einem Beispiel.

Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache. Falls es ein Complexity Core  $\mathcal{H}$  von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C} = \mathcal{P}$  gibt, so bedeutet dies für alle  $t \geq 1$ , daß alle deterministischen Turingmaschinen, die  $L$  akzeptieren, bei Eingabe  $x$  für fast alle  $x \in \mathcal{H}$  mehr als  $|x|^t$  Schritte machen.

Falls es nämlich eine deterministische Turingmaschine  $M$  mit  $L(M) = L$  und ein  $t \geq 1$  gibt, so daß  $M$  auf einer unendlichen Teilmenge  $U \subseteq \mathcal{H}$  maximal  $|x|^t$  Schritte bei Eingabe  $x \in U$  macht, so wird die Sprache

$$C = \{x : M \text{ akzeptiert } x \text{ in maximal } |x|^t \text{ Schritten}\}$$

in P-Zeit akzeptiert. Es gilt somit  $C \in \mathcal{C}_L$  und  $|\mathcal{H} \cap C| = \infty$ . Dies ist ein Widerspruch dazu, daß  $\mathcal{H}$  ein Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C} = \mathcal{P}$  ist.

Wir benötigen noch einige Begriffe.

**Definition 4.7**

Sei  $S \subseteq \Sigma^*$  eine unendliche Menge. Wir nennen eine Folge  $X = \{x_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine rekursive Aufzählung von  $S$ , wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Folge  $X$  ist eine Aufzählung von  $S$ .
2. Es gibt eine deterministische Turingmaschine, die für alle  $i \in \mathbb{N}_0$  bei Eingabe  $1^i$  den String  $x_i$  ausgibt.

Ist die Folge  $X$  darüber hinaus eine wiederholungsfreie Aufzählung von  $S$ , so nennen wir sie eine rekursive wiederholungsfreie Aufzählung.

Entsprechend sind die Begriffe *rekursiv aufzählbare*, *rekursiv wiederholungsfrei aufzählbar* und *rekursiv aufzählen* zu verstehen.

Wir führen in der folgenden Definition einige Begriffe ein, die in der Literatur (vergleiche [5]) üblich sind.

**Definition 4.8** Sei  $\mathcal{C}$  eine Klasse von Sprachen in  $\Sigma^*$ .

1. Die Klasse  $\mathcal{C}$  heißt *rekursiv aufzählbar*, wenn es eine Folge  $\{C_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  von Sprachen in  $\mathcal{C}$  und eine deterministische Turingmaschine gibt, die bei Eingabe von  $1^i$ ,  $i \in \mathbb{N}_0$ , die Kodierung einer deterministischen Turingmaschine ausgibt, die  $C_i$  erkennt, und wenn ferner

$$\mathcal{C} = \bigcup_{i \in \mathbb{N}_0} \{C_i\}$$

gilt. Wir nennen  $\{C_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  dann auch *rekursive Aufzählung* von  $\mathcal{C}$ .

2. Wir sagen,  $\mathcal{C}$  ist *abgeschlossen unter endlicher Vereinigung*, wenn für alle unendlichen Sprachen  $C_1, C_2 \in \mathcal{C}$  gilt:

$$C_1 \cup C_2 \in \mathcal{C}.$$

3. Die Menge  $\mathcal{C}$  heißt *abgeschlossen unter endlicher Variation*, wenn für alle unendlichen Sprachen  $C \in \mathcal{C}$  und alle endlichen Sprachen  $F \subseteq \Sigma^*$  stets  $F \cup C \in \mathcal{C}$  und  $C \setminus F \in \mathcal{C}$  gilt.

Da wir Theorem 2.10 aus [5] verwenden, dessen Beweis dort unglücklicherweise fehlerhaft ist, geben wir einen eigenen Beweis für diesen Satz an. Wir formulieren zunächst den Satz.

**Satz 4.9** Sei  $\mathcal{C}$  eine rekursiv aufzählbare Klasse rekursiver Sprachen, die unter endlicher Vereinigung und unter endlicher Variation abgeschlossen ist. Jede unendliche rekursive Sprache  $L \notin \mathcal{C}$  hat ein rekursives echtes Complexity Core bezüglich  $\mathcal{C}$ .

**Beweis:** Sei  $\{C_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  im folgenden eine beliebige, aber feste rekursive Aufzählung der Menge  $\mathcal{C}$ . Sei weiter  $\{x_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine beliebige, aber feste rekursive wiederholungsfreie Aufzählung von  $\Sigma^*$ . Die Idee der Konstruktion besteht darin, alle Sprachen  $C_i$  aus  $\mathcal{C}$  nacheinander in eine Menge  $U$  aufzunehmen und parallel dazu ein Complexity Core  $\mathcal{H}$  zu berechnen. Dies geschieht, indem man sicherstellt, daß man nie einen String in  $\mathcal{H}$  aufnimmt, der in einer der Sprachen in  $U$  liegt. Ein Problem besteht darin, daß es schwierig ist, die Sprachen  $C_i \in \mathcal{C}$  rekursiv aufzuzählen. Dieses löst man, indem man alle Sprachen aus  $\mathcal{C}$  rekursiv aufzählt und parallel zur Konstruktion von  $\mathcal{H}$  für alle  $C \in U$  testet, ob es ein  $x \in \bar{L}$  gibt mit  $x \in C$ . In diesem Fall gilt  $C \notin \mathcal{C}_L$  und wir entfernen  $C$  aus der Menge  $U$ .

## Algorithmus 4.10

<i>BEGIN</i>	(1)
Setze $U = \emptyset; \mathcal{H} = \emptyset; i = 0; n = -1;$	(2)
<i>LOOP FOREVER</i>	(3)
Setze $U = U \cup \{C_i\};$	(4)
<i>REPEAT</i>	(5)
Setze $n = n + 1;$	(6)
<i>IF</i> $x_n \notin L$	(7)
<i>THEN</i> <i>FORALL</i> $C \in U$ , für die $x_n \in C$ gilt,	(8)
Setze $U = U \setminus \{C\};$	(9)
<i>UNTIL</i> Es gilt $x_n \in L$ und $x_n \notin \bigcup_{C \in U} C;$	(10)
Setze $\mathcal{H} = \mathcal{H} \cup \{x_n\}; i = i + 1;$	(11)
<i>END</i>	(12)

Wir zeigen zunächst, daß die innere Schleife (Schritt (5) bis Schritt (10)) stets terminiert.

Wir nehmen an, daß die innere Schleife irgendwann nicht terminiert. Dann gibt es einen Wert  $j$  der Variable  $i$ , so daß beim  $j$ -ten Aufruf der inneren Schleife diese nicht abbricht. Sei  $n_j$  der Wert, den die Variable  $n$  hat, bevor die Schleife betreten wird, und sei  $U_j$  der Wert, den die Menge  $U$  zu diesem Zeitpunkt hat. Innerhalb dieser Schleife kommen keine neuen Mengen  $C$  zu  $U$  mehr hinzu, sondern alle  $C \in U_j$ , für die es ein  $x_n \in \bar{L} \cap C$  mit  $n \geq n_j$  gibt, werden aus  $U$  entfernt. Nachdem die Schleife daher oft genug durchlaufen wurde, gilt für alle  $C$ , die dann noch in  $U$  enthalten sind:

$$C \cap \bar{L} \subseteq \{x_n : n < n_j\}. \quad (4.1)$$

Sei  $n_k$  der Wert der Variable  $n$  zu diesem Zeitpunkt und  $U_k$  entsprechend der Wert der Variable  $U$ . Terminiert die Schleife nicht, so folgt, daß die Abbruchbedingung nicht erfüllt ist, und daher gilt für alle  $x_n \in L$  mit  $n \geq n_k$ :

$$x_n \in \bigcup_{C \in U_k} C.$$

Sei  $\tilde{L} = \bigcup_{C \in U_k} C$ . Da  $\mathcal{C}$  unter endlicher Vereinigung abgeschlossen ist, gilt  $\tilde{L} \in \mathcal{C}$ . Dann ist

$$\tilde{L} \setminus L \subseteq \{x_n : n < n_k\}$$

und

$$L \setminus \tilde{L} \subseteq \{x_n : n < n_k\}.$$

Also gibt es endliche Mengen  $F_1, F_2$  mit  $L = (\tilde{L} \cup F_1) \setminus F_2$ . Da  $\tilde{L} \in \mathcal{C}$  gilt und  $\mathcal{C}$  unter endlicher Variation abgeschlossen ist, folgt:  $L \in \mathcal{C}$ . Dies ist ein Widerspruch zur Voraussetzung.

Somit terminiert die innere Schleife und in die Menge  $\mathcal{H}$  wird dann ein Element aufgenommen, das vorher noch nicht in  $\mathcal{H}$  enthalten war. Da aus  $\mathcal{H}$  in keinem Schritt des Algorithmus ein Element entfernt wird, zählt dieser Algorithmus in  $\mathcal{H}$  eine unendliche Menge auf.

Weiter ist zu zeigen, daß für alle  $C' \in \mathcal{C}_L$  gilt

$$|\mathcal{H} \cap C'| < \infty.$$

Sei  $C' \in \mathcal{C}_L$ , und sei  $i$  die Nummer von  $C'$  in der obigen Aufzählung von  $\mathcal{C}$ . Dann wird  $C'$  im  $i$ -ten Durchlauf der äußeren Schleife in die Menge  $U$  aufgenommen. Darüber hinaus wird  $C'$  nie wieder aus  $U$  entfernt, da wegen  $C' \in \mathcal{C}_L$  für alle  $x_n \notin L$  auch  $x_n \notin C'$  gilt. Nachdem  $C'$  in  $U$  aufgenommen wurde, werden aber nur noch  $x_n$  in  $\mathcal{H}$  aufgenommen, für die

$$x_n \notin \bigcup_{C \in U} C$$

gilt, d.h. insbesondere

$$x_n \notin C'.$$

Daher gilt

$$|\mathcal{H} \cap C'| < \infty.$$

Es bleibt zu zeigen, daß die von obigem Algorithmus konstruierte Menge  $\mathcal{H}$  eine rekursive Sprache ist. Folgender Algorithmus erkennt  $\mathcal{H}$ : Bei Eingabe  $x$  wird die eindeutige Zahl  $m \in \mathbb{N}$  berechnet, für die  $x_m = x$  gilt. Dann wird der Algorithmus 4.10 solange simuliert, bis der Wert der Variablen  $n$  genau  $m + 1$  ist. Wurde zuvor  $x_m$  in die Menge aufgenommen, die durch die Variable  $\mathcal{H}$  repräsentiert wird, so wird 1 ausgegeben, sonst 0. Offenbar terminiert dieser Algorithmus bei allen Eingaben  $x$  und gibt genau dann 1 aus, wenn  $x$  zu irgendeinem Zeitpunkt von Algorithmus 4.10 in die Menge  $\mathcal{H}$  aufgenommen wird. Daraus folgt, daß das konstruierte Complexity Core eine rekursive Sprache ist. ■

#### 4.2.2 Ein Hierarchiesatz für $\text{DTime}_\mu^R(T)$

In [9] werden Zeit- und Bandhierarchiesätze für die worst-case Komplexitätstheorie vorgestellt. Auch für schwache average-case Modelle  $R = (H, V)$  können solche Sätze gezeigt werden. Wir zeigen im folgenden einen Zeithierarchiesatz. Analog beweist man entsprechende Bandhierarchiesätze.

**Satz 4.11** Sei  $\omega \in \Omega_R$ . Sei  $g \in H$ , längenwachsend, sei  $h \in H$  längenwachsend und voll zeitkonstruierbar, und sei  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$ ,  $f \in H$ ,  $f(\cdot) \geq 2 \cdot |\cdot| + 6$ , eine längenwachsende, voll zeitkonstruierbare Funktion, die  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert. Gilt ferner

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\widehat{f}(n) \cdot \log(\widehat{f}(n))}{\widehat{h}(n)} = 0,$$

so gibt es eine Dichte  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$ , so daß

$$DTime_\mu^R(\{g\}) \subseteq DTime_\mu^R(\{f\}) \subseteq DTime_\mu^R(\{h\})$$

aber

$$DTime_\mu^R(\{g\}) \neq DTime_\mu^R(\{h\})$$

gilt.

**Beweis:** Die Idee zur Konstruktion einer Dichte  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$  und einer Sprache

$$L \in DTime_\mu^R(\{h\}) \setminus DTime_\mu^R(\{g\})$$

besteht darin, ein Complexity Core  $\mathcal{H}$  zu einer Sprache

$$L \in DTime(\{\widehat{h}\}) \setminus DTime(\{\widehat{f}\})$$

zu konstruieren und  $\mu$  so zu wählen, daß  $SUP(\mu) = \mathcal{H}$  gilt. Mittels der schwachen Antisymmetrieeigenschaft und der Tatsache, daß  $f$  die Funktion  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert, läßt sich die Aussage des Satzes dann folgern.

Die Funktion  $f$  spielt im obigen Satz die Rolle, die die Funktion  $g(x) + 1$  im entsprechenden Satz der worst-case Theorie inne hat. Sie "trennt" die Funktion  $g$  von der Vergleichsfunktion  $h$ . In unserem Kontext ist  $f$  nötig, da wir nur die schwache Antisymmetrieeigenschaft voraussetzen.

Da nach Voraussetzung  $f$  die Funktion  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert, gilt  $g \leq f$ . Daher ist  $g \leq f \leq h$  erfüllt und für alle Dichten  $\tau$  gilt

$$DTime_\tau^R(\{g\}) \subseteq DTime_\tau^R(\{f\}) \subseteq DTime_\tau^R(\{h\}),$$

da  $R$  verträglich mit  $\leq$  ist. Nach dem Zeithierarchiesatz der klassischen Komplexitätstheorie (vergleiche Satz 4.5) gibt es eine Sprache

$$L \in DTime(\{\widehat{h}\}) \setminus DTime(\{\widehat{f}\}). \quad (4.2)$$

Somit gibt es zu jeder deterministischen Turingmaschine, die  $L$  akzeptiert, eine unendliche Menge von Strings  $x$ , an denen sie mehr als  $f(x)$  Schritte macht.

*Behauptung:*

*Es gibt eine Dichte  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$ , so daß alle deterministischen Turingmaschinen  $M$  mit*

$$L(M) = L$$

*auf fast allen Eingaben  $x \in SUP(\mu)$  mehr als  $f(x)$  Schritte machen.*

Aus dieser Behauptung folgt dann insbesondere für alle Turingmaschinen, die  $L$  akzeptieren, daß für ihre Laufzeit  $t$  gilt:

$$f \leq_{\text{SUP}(\mu)} t.$$

Somit ist gemäß Lemma 2.24

$$t \not\leq_{\mu}^R g,$$

und daher gilt

$$L \notin \text{DTIME}_{\mu}^R(\{g\}).$$

Wir zeigen nun obige Behauptung:

Wir konstruieren im folgenden zunächst eine Menge  $\mathcal{H}$ , von der wir zeigen werden, daß alle deterministischen Turingmaschinen  $M$  mit  $L(M) = L$  auf fast allen  $x \in \mathcal{H}$  mehr als  $f(x)$  Schritte benötigen. Dann konstruieren wir eine Dichte  $\mu \in \mathcal{D}_{\omega}$  mit  $\text{SUP}(\mu) = \mathcal{H}$ .

Da  $f(\cdot) \geq 2 \cdot |\cdot| + 6$  gilt, ist nach dem Beschleunigungssatz (Satz 4.3)

$$\text{DTIME}(\hat{f}) = \text{DTIME}(O(\hat{f})).$$

Die Klasse

$$\mathcal{C} = \text{DTIME}(O(\hat{f}))$$

ist aber unter endlicher Vereinigung und endlicher Variation abgeschlossen, wie wir im folgenden zeigen werden. Sind  $L_1, L_2 \in \mathcal{C}$ , so gibt es zwei deterministische Turingmaschinen  $M_1, M_2$  und Konstanten  $c_1, c_2 > 1$ , so daß  $M_i, i = 1, 2$ , eine Eingabe  $x \in \Sigma^*$  genau dann in höchstens  $c_i \cdot f(x)$  Schritten akzeptiert, wenn  $x \in L_i$  gilt. Man betrachte die folgende deterministische Turingmaschine  $M$ : Bei Eingabe von  $x \in \Sigma^*$  führt  $M$  die Berechnungen der Maschinen  $M_1$  und  $M_2$  parallel maximal  $\max\{c_1, c_2\} \cdot f(x)$  Schritte lang aus. Diese Schranke ist voll zeitkonstruierbar, da  $f$  voll zeitkonstruierbar ist. Die Maschine  $M$  akzeptiert die Eingabe genau dann, wenn eine dieser Berechnungen zum Akzeptieren führt. Daher ist die Laufzeit von  $M$  durch  $O(f)$  beschränkt, und  $\mathcal{C}$  ist unter endlicher Vereinigung abgeschlossen. Ebenso zeigt man, daß  $\mathcal{C}$  unter endlicher Variation abgeschlossen ist.

Wir können Satz 4.9 auf  $\mathcal{C}$  und  $L$  anwenden, und somit gibt es zu  $L$  (vergleiche Formel (4.2)) eine Menge  $\mathcal{H} \subseteq L$ , so daß für alle  $C \in \mathcal{C}_L$  gilt:

$$|C \cap \mathcal{H}| < \infty.$$

Somit benötigen alle deterministischen Turingmaschinen an fast allen Eingaben  $x \in \mathcal{H}$  mehr als  $f(x)$  Schritte.

Offensichtlich gibt es Dichten  $\mu \in \mathcal{D}_{\omega}$  mit  $\text{SUP}(\mu) = \mathcal{H}$ , zum Beispiel

$$\mu(x) = \begin{cases} \omega(|x|) \cdot \frac{c}{|\mathcal{H} \cap \Sigma^{|x|}|} & \text{für } x \in \mathcal{H} \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (4.3)$$

wobei  $c$  die Normierungskonstante ist. Damit ist die obige Behauptung und der Satz bewiesen. ■

Falls die im vorangehenden Satz vorausgesetzte Dichte  $\omega$  auf  $\mathbb{N}_0$  berechenbar ist, ist auch die konstruierte Dichte  $\mu$  (vergleiche (4.3)) berechenbar, da nach Satz 4.9 das Complexity Core  $\mathcal{H}$ , das zur Konstruktion von  $\mu$  verwendet wird, eine rekursive Sprache ist.

### 4.2.3 Die Sprachklassen $\overline{DTime}_\mu^R(T)$

Sei  $\mu \in \mathcal{D}$  eine Dichte,  $R$  ein Vergleichsmodell und  $g \in \mathcal{F}$ . Man beachte, daß  $DTime_\mu^R(\{g\})$  die Menge aller Sprachen  $L$  ist, für die es eine Turingmaschine gibt, die genau die Sprache  $L$  akzeptiert und die die mittlere Laufzeit  $g$  bezüglich  $\mu$  hat. Ist  $L \notin DTime_\mu^R(\{g\})$ , so heißt dies, daß es keine deterministische Turingmaschine  $M$  gibt mit  $L(M) = L$  und Laufzeit  $t \leq_\mu^R g$ . Ist  $SUP(\mu) \neq \Sigma^*$ , so kann es aber durchaus eine deterministische Turingmaschine  $M'$  geben mit

$$L(M') \cap SUP(\mu) = L \cap SUP(\mu)$$

und einer Laufzeit  $t \leq_\mu^R g$ , d.h. für alle  $x \in SUP(\mu)$  gilt:  $M'$  akzeptiert  $x$  genau dann, wenn  $x \in L$  gilt. Für alle  $x \in \Sigma^* \setminus SUP(\mu)$  kann nicht gesagt werden, ob  $M'$  akzeptiert oder nicht, aber auf den "wesentlichen" Eingaben  $x \in SUP(\mu)$  "arbeitet"  $M'$  korrekt.

Sei  $T \subseteq \mathcal{F}$ ,  $D \subseteq \mathcal{D}$  und  $R$  ein Vergleichsmodell. Wir bezeichnen mit

$$\overline{DTime}_D^R(T)$$

die Menge der Sprachen  $L \subseteq \Sigma^*$ , so daß es für alle  $\mu \in D$  eine deterministische Turingmaschine  $M$  mit

$$L(M) \cap SUP(\mu) = L \cap SUP(\mu)$$

gibt, für deren Laufzeit  $t_M \in T_\mu^R$  gilt. Entsprechend sind  $\overline{NTime}_D^R(T)$ ,  $\overline{DSpace}_D^R(T)$  und  $\overline{NSpace}_D^R(T)$  zu verstehen.

Legt man die Sprachklassen  $\overline{DTime}_D^R(T)$  den Überlegungen zu Zeithierarchiesätzen zugrunde, so funktioniert der Beweis zu Satz 4.11 nicht mehr, da dort

$$SUP(\mu) \subseteq L$$

gilt und jede Turingmaschine, die konstant die 1 ausgibt, damit auf  $SUP(\mu)$  das richtige Ergebnis liefert. Das Konzept der Complexity Cores scheint in diesem Zusammenhang zu schwach zu sein.

Betrachtet man die positiven Beispiele für schwache average-case Modelle mit Ausnahme des Reischuk-Schindelhauer-Modells, so sieht man, daß man in allen Fällen den Beweis von Satz 4.11 derart modifizieren kann, daß dieser Satz für ein  $\mu$  mit  $SUP(\mu) = \Sigma^*$  gilt. Dies erreicht man, indem man die folgende Dichte

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{c}{|x|^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{2^{2 \cdot |x|}}\right) \cdot \frac{1}{|\mathcal{H} \cap \Sigma^{|x|}|} & \text{falls } x \in \mathcal{H}, \\ \frac{c}{|x|^2} \cdot \frac{1}{2^{2 \cdot |x|}} \cdot \frac{1}{|\mathcal{H} \cap \Sigma^{|x|}|} & \text{sonst,} \end{cases}$$

wählt. Dabei ist  $c > 0$  die Normierungskonstante. Dann spielen die Elemente aus  $\Sigma^* \setminus \mathcal{H}$  gewissermaßen keine Rolle bei der Bestimmung, ob  $f \leq_\mu^R g$  gilt, während  $SUP(\mu) = \Sigma^*$  erfüllt ist. Im Reischuk-Schindelhauer-Modell gelten darüber hinaus sogar wesentlich feinere Hierarchiesätze. (Vergleiche [13].)

Um wiederum einen allgemeingültigen Hierarchiesatz für schwache average-case Modelle und Sprachklassen  $\overline{DTIME}_\mu^R(T)$  zu erhalten, bietet es sich an, nach einem stärkeren, der Idee der Complexity Cores verwandten Konzept zu suchen. Im folgenden Abschnitt stellen wir dieses neue Konzept, das wir *Super Complexity Cores* nennen, vor.

#### 4.2.4 Theorie der Super Complexity Cores

In Abschnitt 4.2.1 zeigen wir die Existenz eines Complexity Cores  $\mathcal{H}$  zu einer gegebenen Sprache  $L$  und einer Komplexitätsklasse  $\mathcal{C}$ . Dabei handelt es sich bei  $\mathcal{C}$  zum Beispiel um  $DTIME(T)$ , wobei  $T \subseteq \mathcal{F}$  eine geeignete Menge von Laufzeitfunktionen ist. Dann gilt für  $t \in T$  und alle deterministischen Turingmaschinen  $M$  mit

$$L(M) = L,$$

daß für fast alle  $x \in \mathcal{H}$  die Turingmaschine  $M$  bei Eingabe  $x$  mehr als  $t(x)$  Schritte macht. Eine Menge  $S$ , für die diese Aussage für die größere Menge der deterministischen Turingmaschinen  $M$  mit

$$L(M) \cap S = L \cap S$$

gilt, d.h. für die Menge der deterministischen Turingmaschinen, die  $\chi_L$  auf  $S$  korrekt berechnen, nennen wir *Super Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ . Ist  $L \in DTIME(h)$  für ein  $h \in \mathcal{F}$ , so kann  $\chi_L$  in Zeit  $h$  auf  $S$  berechnet werden. Diese Eigenschaft ist zum Beweis des Satzes 4.39 von Bedeutung.

Die Existenz von Super Complexity Cores ist unseres Wissens nach lediglich in einem Spezialfall untersucht worden. In [18] stellen J. Balcázar und U. Schöning den Begriff einer sogenannten *biimmunen Menge* bezüglich einer gegebenen Komplexitätsklasse  $\mathcal{C}$  vor und zeigen die Existenz einer biimmunen Menge bezüglich der Komplexitätsklasse  $\mathcal{P}$ . Dabei steht der Begriff der biimmunen Menge in folgender Beziehung zu unserer Theorie: Ist  $L \notin \mathcal{C}$ , und ist  $S$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , so sind  $S \cap L$  und  $S \cap \bar{L}$  biimmune Mengen bezüglich  $\mathcal{C}$ .

Sei im folgenden  $T \subseteq \mathcal{F}$  eine Menge von Funktionen mit folgenden Eigenschaften:

1. Zu allen  $t \in T$  gibt es eine zeitkonstruierbare Funktion  $t' \in T$ ,  
so daß für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:  $t(x) \leq t'(x)$ .
2. Die Menge  $T$  ist bezüglich  $\leq$  abgeschlossen.
3. Für die Funktion  $|\cdot|$ , die jedem  $x \in \Sigma^*$  den Wert  $|x|$  zuordnet, gilt  $|\cdot| \in T$ .
4. Für alle  $k \in \mathbb{N}$  und alle  $t_1, \dots, t_k \in T$  gilt  $\sum_{i=1}^k t_i \in T$ .

Offenbar gilt für alle  $t \in T$

$$O(t) \subseteq T.$$

Wir betrachten in diesem Abschnitt sogenannte *normale* Sprachklassen, die wir nun definieren.

**Definition 4.12** Eine Sprachklasse  $\mathcal{C}$  mit  $\mathcal{C} = DTime(T)$ , wobei  $T \subseteq \mathcal{F}$  eine Menge von Funktionen ist, die die obigen Eigenschaften hat, heißt *normal*.

**Definition 4.13** Sei  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ ,  $S \subseteq \Sigma^*$  und  $M$  eine deterministische Turingmaschine. Wir sagen, daß  $M$  die Funktion  $f$  auf  $S$  berechnet, wenn für alle  $x \in S$

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

gilt.

**Definition 4.14** Sei  $T \subseteq \mathcal{F}$  eine Menge von Funktionen, so daß  $\mathcal{C} = DTime(T)$  eine normale Klasse von Sprachen ist, und sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache mit  $L \notin \mathcal{C}$ . Eine Menge  $S \subseteq \Sigma^*$  heißt *Super Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1.  $S$  ist eine unendliche Menge.
2. Für alle deterministischen Turingmaschinen  $M$ , die  $\chi_L$  auf  $S$  berechnen und für alle  $t \in T$  gilt: Die Turingmaschine  $M$  macht bei fast allen Eingaben  $x \in S$  mehr als  $t(x)$  Schritte.

Sei im folgenden  $\mathcal{C} = DTime(T)$  eine normale Sprachklasse. Offenbar gilt der folgende Satz:

**Satz 4.15**

1. Jedes *Super Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist auch ein *Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ .
2. Falls es ein *Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  gibt, so gibt es auch ein solches, das kein *Super Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist.

**Beweis:** Die erste Behauptung des obigen Satzes folgt aus den entsprechenden Definitionen. Die zweite Behauptung ergibt sich wie folgt: Kein *Complexity Core*  $\mathcal{H}$  von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  mit  $\mathcal{H} \subseteq L$  oder  $\mathcal{H} \subseteq \bar{L}$  ist ein *Super Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ . Ist  $\mathcal{H}$  ein *Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , so ist entweder  $\mathcal{H} \cap L$  eine unendliche Menge und damit selbst wieder ein *Complexity Core* von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  oder es gilt dies für  $\mathcal{H} \cap \bar{L}$ . ■

In Anlehnung an ähnliche Sachverhalte in [18] geben wir nun zwei Charakterisierungen von *Super Complexity Cores* an, die wir später zur Konstruktion eines solchen benötigen. Wir werden im nächsten Satz zeigen, daß das Konzept eines *Super Complexity Cores* einer Sprache  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  und die in der folgenden Definition eingeführten  $\mathcal{C}$ -biimmunen Paare von  $L$  im wesentlichen äquivalent sind.

**Definition 4.16** Seien  $A \subseteq \Sigma^*$ ,  $B \subseteq \Sigma^*$  Mengen. Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache. Das Paar  $(A, B)$  heißt  *$\mathcal{C}$ -biimmunes Paar* von  $L$ , wenn gilt:

1.  $|A| = \infty$ ,  $|B| = \infty$ ,  $A \subseteq L$ ,  $B \subseteq \bar{L}$ , und
2. für alle Sprachen  $C \in \mathcal{C}$  mit  $C \cap A = \emptyset$  oder  $C \cap B = \emptyset$  gilt

$$|C \cap (A \cup B)| < \infty.$$

**Satz 4.17** Seien  $A, B, S, L \subseteq \Sigma^*$ .

1. Ist  $(A, B)$  ein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$ , dann ist  $S = A \cup B$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ .
2. Ist  $L$  eine rekursive Sprache, und ist  $S$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , dann ist  $(A, B)$  mit  $A = S \cap L$  und  $B = S \cap \bar{L}$  ein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$ .

**Beweis:** Sei angenommen, daß  $S$  kein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist. Das heißt, daß es ein  $t \in T$  und eine deterministische Turingmaschine  $M$  gibt, die  $\chi_L$  auf  $S$  berechnet, so daß für die Laufzeitfunktion  $t_M$  von  $M$  folgendes gilt:

$$|\{x \in S : t_M(x) \leq t(x)\}| = \infty.$$

Sei  $D = \{x \in S : t_M(x) \leq t(x)\}$ . O.B.d.A. gilt  $|D \cap A| = \infty$ . Nach Voraussetzung gibt es zu  $t$  eine zeitkonstruierbare Funktion  $t' \in T$  mit  $t \leq t'$ . Man betrachte die Maschine  $M'$ : Bei Eingabe  $x$  läßt die Maschine  $M'$  zunächst  $M$  mit der Eingabe  $x$  genau  $t'(x)$  Schritte laufen. Dies wird erreicht, indem parallel dazu die zeitkonstruierbare Funktion  $t'$  auf zusätzlichen Arbeitsbändern berechnet wird. Hält  $M$  innerhalb dieser Zeit, so gibt  $M'$  das Ergebnis von  $M$  aus und hält, sonst gibt  $M'$  das Zeichen 0 aus. Sei  $C$  die von  $M'$  akzeptierte Sprache. Es gilt  $D \cap L \subseteq C$  und  $C \in \mathcal{C}$ . Ferner gilt

$$C \cap B \subseteq C \cap \bar{L} = \emptyset$$

und

$$|C \cap (A \cup B)| \geq |D \cap A| = \infty.$$

Das bedeutet aber, daß  $(A, B)$  kein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$  ist.

Sei nun angenommen, daß  $(A, B)$  kein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$  ist. Das heißt, o.B.d.A. gibt es ein  $C \in \mathcal{C}$  mit  $C \cap B = \emptyset$  und  $|C \cap (A \cup B)| = \infty$ . Somit gilt  $|C \cap S| = \infty$ . Sei  $M$  eine deterministische Turingmaschine mit Laufzeitfunktion  $t_M \in T$ , die  $C$  akzeptiert, und sei  $M_L$  eine deterministische Turingmaschine, die  $\chi_L$  auf  $\Sigma^*$  berechnet. Man betrachte folgende deterministische Turingmaschine  $E$ : Bei Eingabe  $x$  rechnet  $E$  parallel wie  $M$  und  $M_L$ . Falls die Simulation von  $M$  zuerst beendet wird und sich als Ergebnis der Wert 1 ergibt, gibt  $E$  auch 1 aus und stoppt. Andernfalls beendet  $E$  die Simulation von  $M_L$  und gibt als Ergebnis das Ergebnis der Berechnung von  $M_L$  aus.

Wir zeigen zunächst, daß  $E$  die Funktion  $\chi_L$  auf  $S$  berechnet: Sei  $x \in S$ . Falls zuerst die Simulation von  $M$  beendet wird und  $M(x) = 1$  gilt, folgt  $x \in C$ . Da  $C \cap B = \emptyset$  gilt, ist daher  $x \in A \subseteq L$  und  $E$  gibt offenbar korrekt 1 aus. Andernfalls simuliert  $E$  die Berechnung von  $M_L$  zu Ende und gibt  $M_L(x) = \chi_L(x)$  nach Voraussetzung über  $M_L$  aus. Also berechnet  $E$  die Funktion  $\chi_L$  auf  $S$ .

Sei  $t_E$  die Laufzeitfunktion von  $E$ . Dann gibt es ein  $c > 0$ , so daß für alle  $x \in C$  gilt

$$t_E(x) \leq c \cdot t_M(x).$$

Setzt man  $t = c \cdot t_M$ , dann ist nach Voraussetzung  $t \in T$  und es gilt

$$\infty = |C| \leq |\{x \in S : t_E(x) \leq t(x)\}|.$$

Daher ist  $S$  kein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ . ■

Aus dem obigen Satz ergibt sich, daß wir uns im folgenden auf die Untersuchung  $\mathcal{C}$ -biimmuner Paare  $(A, B)$  von  $L$  zurückziehen können.

Um die zweite Charakterisierung zu zeigen, ist es nötig, einige Begriffe einzuführen.

Sei  $\text{Funk}(T)$  die Menge aller Funktionen  $t : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ , die von einer deterministischen Turingmaschine in  $T$ -Zeit berechnet werden.

**Definition 4.18** Seien  $V, W \subseteq \Sigma^*$  mit  $V \cap W = \emptyset$ . Eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  heißt

1.  $(V, W)$ -treu, wenn  $f(V) \cap f(W) = \emptyset$  gilt.
2.  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(V, W)$ , wenn  $f \in \text{Funk}(T)$  gilt und  $f$  eine  $(V, W)$ -treue Funktion ist.

Somit gilt für  $\mathcal{C}$ -Reduktionen  $f$  eines Paares disjunkter Mengen  $(V, W)$  und für alle  $x \in V$  und  $y \in W$

$$f(x) \neq f(y).$$

Wie man leicht sieht, gilt das folgende Lemma.

**Lemma 4.19** Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache. Dann ist die identische Funktion  $f(x) = x$  eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(L, \bar{L})$ .

Wir bezeichnen mit  $\text{Red}_T(V, W)$  die Menge aller  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(V, W)$  und setzen

$$N\text{-Red}_T(V, W) = \text{Funk}(T) \setminus \text{Red}_T(V, W).$$

Somit ist  $N\text{-Red}_T(V, W)$  die Menge aller durch deterministische Turingmaschinen berechenbaren Abbildungen von  $\Sigma^*$  nach  $\Sigma^*$ , die keine  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(V, W)$  sind.

Von besonderer Bedeutung sind im folgenden Funktionen, die "fast injektiv" auf einer gegebenen Menge  $V$  sind, die nämlich stets nur endlich vielen verschiedenen Urbildern aus  $V$  das gleiche Bild zuordnen.

**Definition 4.20** Sei  $V \subseteq \Sigma^*$  eine Menge. Eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  heißt finite-one auf  $V$ , wenn für alle  $y \in \Sigma^*$

$$|f^{-1}(y) \cap V| < \infty$$

gilt.

Wir kommen nunmehr zur zweiten Charakterisierung der Super Complexity Cores:

**Satz 4.21** *Seien  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache,  $A \subseteq L$ ,  $B \subseteq \bar{L}$ ,  $|A| = \infty$  und  $|B| = \infty$ . Dann gilt:  $(A, B)$  ist ein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$  genau dann, wenn alle  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(A, B)$  finite-one auf  $A \cup B$  sind.*

**Beweis:** Angenommen, es gibt eine Funktion  $f \in \text{Red}_T(A, B)$ , die nicht finite-one auf  $A \cup B$  ist. Dann gibt es ein  $z \in \Sigma^*$  mit

$$|f^{-1}(z) \cap (A \cup B)| = \infty.$$

Setze nun  $C = f^{-1}(z)$ . Es gilt  $C \in \mathcal{C}$ , denn: Sei  $M$  die deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine, die  $f$  berechnet. Dann berechnet folgende Maschine  $M'$  die Sprache  $C$  in  $T$ -Zeit. Bei Eingabe  $x$  startet  $M'$  zunächst die Maschine  $M$  und vergleicht das Ergebnis dieser Berechnung mit  $z$ . War das Ergebnis  $z$ , so gibt  $M'$  den Wert 1 aus, sonst gibt  $M'$  den Wert 0 aus. Da  $f$  nach Voraussetzung eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(A, B)$  ist, gilt für alle  $x, y \in A \cup B$  mit  $f(x) = f(y)$ , daß entweder  $x, y \in A$  oder  $x, y \in B$  gilt. Daher ist entweder  $C \cap A = \emptyset$  oder  $C \cap B = \emptyset$ , und  $(A, B)$  ist kein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$ .

Sei nun angenommen, daß  $(A, B)$  kein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$  ist. Dann gibt es eine Sprache  $C \in \mathcal{C}$  mit o.B.d.A.  $C \cap B = \emptyset$  und  $|C \cap (A \cup B)| = \infty$ . Sei  $x_0$  ein kürzestes Wort in  $C \cap (A \cup B)$ . Betrachte nun die Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  mit

$$f(x) = \begin{cases} x_0 & \text{falls } x \in C, \\ x & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Funktion  $f$  kann durch eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine berechnet werden, weil  $C \in \mathcal{C}$  gilt. Für alle  $x, y \in A \cup B$  mit  $f(x) = x_0 = f(y)$  gilt

$$x, y \in C \cap (A \cup B) \subseteq A.$$

Die Funktion  $f$  ist eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion zu  $(A, B)$ , die nicht finite-one auf  $A \cup B$  ist. ■

Wir kommen nun zum Nachweis, daß es zu jeder Sprache  $L \notin \mathcal{C}$  ein Super Complexity Core bezüglich  $\mathcal{C}$  gibt. Die dabei benutzte Konstruktion liefert allerdings nur den mathematischen Nachweis der Existenz eines solchen Super Complexity Cores zu  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , aber kein *rekursives* Super Complexity Core.

Die Idee zum Beweis des Existenzsatzes ist folgende: Ziel ist es, ein Paar unendlicher Mengen  $(A, B)$  mit  $A \subseteq L, B \subseteq \bar{L}$  so zu konstruieren, daß für alle Funktionen  $f \in \text{Funk}(T)$  gilt: Entweder ist  $f \in N\text{-Red}_T(A, B)$  oder  $f$  ist finite-one auf  $A \cup B$ . Am einfachsten wäre es natürlich, wenn man  $A$  und  $B$  so konstruieren könnte, daß  $N\text{-Red}_T(A, B) = \text{Funk}(T)$  gilt. Leider ist das nicht möglich, denn wie man leicht sieht, gilt folgendes Lemma:

**Lemma 4.22** *Sei  $L \subseteq \Sigma^*$ . Für alle  $A \subseteq L, B \subseteq \bar{L}$  mit  $|A| = \infty$  und  $|B| = \infty$  gilt*

$$\emptyset \neq \text{Red}_T(L, \bar{L}) \subseteq \text{Red}_T(A, B).$$

Daher bietet es sich an, folgende Strategie einzuschlagen: Man versucht ein Paar  $(A, B)$  zu konstruieren, so daß  $|A| = \infty$ ,  $|B| = \infty$ ,  $A \subseteq L$ ,  $B \subseteq \bar{L}$  gilt und

1. alle  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  finite-one auf  $A \cup B$  sind, und
2. daß  $N\text{-Red}_T(L, \bar{L}) = N\text{-Red}_T(A, B)$  gilt, daß also für alle  $f \in N\text{-Red}_T(L, \bar{L})$  ein Paar  $a \in A$ ,  $b \in B$  existiert mit  $f(a) = f(b)$ .

Auch diese Strategie stößt auf Schwierigkeiten! Man kann sich wieder leicht überlegen, daß es unmöglich ist, das zweite Ziel zu erreichen, wenn  $(L, \bar{L})$  nicht schon ein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$  ist: Seien dazu  $A, B$  beliebige unendliche Mengen mit  $A \subseteq L$ ,  $B \subseteq \bar{L}$  und o.B.d.A. sei  $B \neq \bar{L}$ . Sei  $a \in A$  und  $z \in \bar{L} \setminus B$ . Dann ist die Funktion

$$f(x) = \begin{cases} a & \text{falls } x = z, \\ x & \text{sonst,} \end{cases}$$

keine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(L, \bar{L})$ , aber sicherlich  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(A, B)$ .

Man sieht, daß die Beispielfunktion  $f$  "im wesentlichen" die identische Funktion ist, die wiederum eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(L, \bar{L})$  ist. Es stellt sich heraus, daß dieser Typ von Funktionen, die keine  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  sind, aber "nahe verwandt" mit einer solchen sind, genau die Funktionen sind, die es schwierig machen, das oben genannte zweite Ziel zu realisieren.

Daher charakterisieren wir die Funktionen diesen Typs in Definition 4.24 und untersuchen sie.

**Definition 4.23** Seien  $V, W \subseteq \Sigma^*$ ,  $V \cap W = \emptyset$ , Mengen und sei  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  eine Funktion. Eine Menge  $(x, y)$  heißt Konfliktpaar von  $f$  bezüglich  $(V, W)$ , wenn entweder  $x \in V$ ,  $y \in W$  oder  $x \in W$ ,  $y \in V$  gilt und wenn  $f(x) = f(y)$  ist. Mit  $P_{f,V,W}$  wird die Menge aller Konfliktpaare von  $f$  bezüglich  $(V, W)$  bezeichnet.

**Definition 4.24** Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache. Eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  heißt Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$ , wenn  $f$  durch eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine berechnet wird, wenn  $P_{f,L,\bar{L}} \neq \emptyset$  gilt und wenn es eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine  $R$  mit folgenden Eigenschaften gibt:

1.  $R(\Sigma^*) \subseteq \{0, 1, ?\}$ .
2. Für alle  $x \in \Sigma^*$  mit  $R(x) \neq ?$  gilt  $R(x) = \chi_L(x)$ .
3. Für alle  $(x, y) \in P_{f,L,\bar{L}}$  gilt  $R(x) \neq ? \vee R(y) \neq ?$ .

Somit ist eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  eine  $T$ -berechenbare Funktion, zu der eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine existiert, die bei allen Eingaben  $x$  einen der Werte 0, 1 oder ? ausgibt. Die Maschine  $R$  "lügt" bei Eingabe aus  $\Sigma^*$  nie: Wenn sie 0 ausgibt, gilt  $x \in \bar{L}$ ; gibt sie 1 aus, so gilt  $x \in L$ . Darüber

hinaus weiß sie für wenigstens ein Element jeden Konfliktpaars, ob dieses in  $L$  oder in  $\bar{L}$  liegt.

Für Beinahe-Reduktionen  $f$  von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  gilt nach Definition

$$P_{f,L,\bar{L}} \neq \emptyset.$$

Daher sind Beinahe-Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  keine  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$ . Alle in  $T$ -Zeit berechenbaren Funktionen  $f$ , die weder  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(L, \bar{L})$  sind, noch zu den Beinahe-Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  gehören, nennen wir *chaotische Funktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$* . Die Menge dieser Funktionen wird mit

$$C\text{-Funkt}_T(L, \bar{L})$$

bezeichnet.

Offenbar gilt das folgende Lemma:

**Lemma 4.25** *Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache. Die Menge der  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$ , die Menge der Beinahe-Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  und in die Menge der chaotischen Funktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  bilden eine Partition der Menge aller durch deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschinen berechenbaren Funktionen  $\text{Funkt}(T)$ .*

Der folgende Satz ist von zentraler Bedeutung, da er in Verbindung mit den vorherigen Überlegungen und dem vorangehenden Lemma die Konstruktion eines  $\mathcal{C}$ -biimmunen Paares von  $L$  ermöglicht.

**Satz 4.26** *Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache und seien  $V \subseteq L$  und  $W \subseteq \bar{L}$  Mengen. Falls es eine Funktion  $f \in \text{Funkt}(T)$  gibt, die*

1. *Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  und*
2.  *$\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(V, W)$  und*
3. *nicht finite-one auf  $V \cup W$  ist,*

*so gibt es eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(L, \bar{L})$ , die nicht finite-one auf  $V \cup W$  ist.*

**Beweis:** Da  $f$  eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  ist, existiert eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine  $R$  mit den Eigenschaften aus Definition 4.24. Man betrachte die Abbildung  $\tilde{f} : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ , die wie folgt definiert ist:

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} 10f(x) & \text{falls } R(x) = ?, \\ 01 & \text{falls } R(x) = 1, \\ 00 & \text{falls } R(x) = 0. \end{cases}$$

Die Abbildung  $\tilde{f}$  kann durch eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine berechnet werden, weil  $R$  eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine ist und  $f$  durch eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine berechnet werden kann.

Seien nun  $x, y \in \Sigma^*$  mit  $\tilde{f}(x) = \tilde{f}(y)$ , dann gibt es folgende Fälle:

1. Der String  $\tilde{f}(x)$  beginnt mit 10. Das heißt, daß die Maschine  $R$  sowohl bei Eingabe  $x$  als auch bei Eingabe  $y$  das Zeichen ? ausgibt. Dann gilt aber  $(x, y) \notin P_{f,L,\bar{L}}$ , weil  $f$  eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist und deshalb  $R$  zumindest für einen String eines Konfliktpaares die Zugehörigkeit zu  $L$  entscheiden kann. Somit ist  $(x, y)$  kein Konfliktpaar von  $f$  bezüglich  $(L, \bar{L})$ .
2. Der String  $\tilde{f}(x)$  ist 01. Das heißt, daß die Maschine  $R$  für  $x$  und  $y$  das Zeichen 1 ausgibt, und somit gilt  $x \in L$  und  $y \in L$ .
3. Der String  $\tilde{f}(x)$  ist 00. Dieser Fall ist analog zu Fall 2.

Daher ist  $P_{\tilde{f},L,\bar{L}} = \emptyset$ , und die Funktion  $\tilde{f}$  ist eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(L, \bar{L})$ .

Die Funktion  $f$  ist nach Voraussetzung nicht finite-one auf  $V \cup W$ . Somit gibt es ein  $y \in \Sigma^*$  mit

$$|f^{-1}(y) \cap (V \cup W)| = \infty.$$

Sei nun  $D = f^{-1}(y) \cap (V \cup W)$ . Es gilt nach Konstruktion

$$\tilde{f}(D) \subseteq \{00, 01, 10y\}.$$

Daraus folgt aber, daß es eine Teilmenge  $D' \subseteq D \subseteq V \cup W$  gibt mit  $|D'| = \infty$  und  $|\tilde{f}(D')| = 1$ . Dann ist  $\tilde{f}$  aber nicht finite-one auf  $V \cup W$ . ■

Wenn es uns gelingt, ein Paar unendlicher Mengen  $A \subseteq L, B \subseteq \bar{L}$  zu konstruieren, das folgende Eigenschaften hat, so ist  $(A, B)$  ein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$ . Dazu muß gelten:

1. Alle  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  sind finite-one auf  $A \cup B$ , und
2. keine chaotische Funktion von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(A, B)$ .

Denn: Gemäß Satz 4.21 muß man lediglich testen, ob es eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion  $f$  von  $(A, B)$  gibt, die nicht finite-one auf  $A \cup B$  ist. Da  $f \in \text{Funk}(T)$  gilt, ergibt sich mit Lemma 4.25 folgende Fallunterscheidung:

1. Falls  $f \in \text{Red}_T(L, \bar{L})$  gilt, ist  $f$  nach Voraussetzung finite-one auf  $A \cup B$ .
2. Falls  $f$  eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  ist, so ergibt sich mit Satz 4.26 ein Widerspruch zum ersten Fall. In diesem Fall erfüllt nämlich  $f$  die Voraussetzungen dieses Satzes, so daß folglich auch ein  $g \in \text{Red}_T(L, \bar{L})$  existiert, das  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(A, B)$  und nicht finite-one auf  $A \cup B$  ist.
3. Falls  $f$  eine chaotische Funktion von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist, ist  $f$  nach Voraussetzung keine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(A, B)$ .

Die Konstruktion eines Super Complexity Cores zu einer Sprache  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  wird nun wie folgt erreicht: Statt die zu konstruierenden Mengen  $A$  und  $B$  induktiv zu definieren, geben wir die Konstruktion in Form eines Algorithmus an. Man beachte dabei, daß dieser Algorithmus lediglich eine mathematische Konstruktion beschreibt und nicht als Skizze einer Turingmaschine verstanden werden kann.

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

**Algorithmus 4.27**

Sei  $\{f_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine Aufzählung aller chaotischen Funktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , und sei  $\{g_j\}_{j \in \mathbb{N}}$  eine Aufzählung aller  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$ .

<i>BEGIN</i>	(1)
Setze $i = -1; j = 0; A = \emptyset; B = \emptyset; R = \emptyset;$	(2)
<i>REPEAT</i>	(3)
<i>LOOP FOREVER</i>	(4)
<i>REPEAT</i>	(5)
$i = i + 1;$	(6)
<i>UNTIL</i> $f_i(A) \cap f_i(B) = \emptyset.$	(7)
Wähle $x \in L, y \in \bar{L}$ , so daß gilt: • $f_i(x) = f_i(y)$ und • $\forall g \in R : g(x) \notin g(A \setminus \{x\}) \wedge g(y) \notin g(B \setminus \{y\});$	(8)
Setze $A = A \cup \{x\}, B = B \cup \{y\};$	(9)
Setze $R = R \cup \{g_j\};$	(10)
Setze $j = j + 1;$	(11)
<i>END</i>	(12)

**Satz 4.28** Schritt (8) des Algorithmus 4.27 kann stets durchgeführt werden.

Zum Beweis des obigen Satzes benötigen wir die Aussage des folgenden Lemmas:

**Lemma 4.29** Seien  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache,  $V \subseteq L, |V| < \infty$ , und  $W \subseteq \bar{L}, |W| < \infty$ . Sei  $k \in \mathbb{N}$ ,  $f \in N\text{-Red}_T(L, \bar{L})$  und sei  $M = \{s_1, \dots, s_k\}$  eine Menge von  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$ . Wenn es für alle Konfliktpaare  $(x, y) \in P_{f, L, \bar{L}}$  eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion  $s_i \in M$ ,  $1 \leq i \leq k$ , und ein  $z \in V \cup W$  gibt mit  $s_i(z) = s_i(x)$  oder  $s_i(z) = s_i(y)$ , dann ist  $f$  eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$ .

**Beweis:** Nach Voraussetzung wird  $f$  durch eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine berechnet. Es bleibt also noch die Existenz der Maschine  $R$  (vergleiche Definition 4.24) zu zeigen.

Die Maschine  $R$  arbeitet bei Eingabe von  $x \in \Sigma^*$  wie folgt:

1. Die Maschine  $R$  prüft, ob es eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion  $s_i \in M$ ,  $1 \leq i \leq k$ , und ein  $z \in V \cup W$  gibt mit  $s_i(z) = s_i(x)$ . Existiert kein solches  $z \in V \cup W$ , dann gibt die Maschine  $R$  das Zeichen ? aus und hält.
2. Andernfalls testet die Maschine  $R$  durch Nachschlagen in einer Tabelle für alle Strings in  $V \cup W$ , ob  $z \in L$  gilt. In diesem Fall gibt  $R$  das Zeichen 1 aus und sonst 0.

Die Maschine  $R$  ist eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine. Dies sieht man wie folgt: Da alle  $s_i$ ,  $1 \leq i \leq k$ ,  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  sind, gibt es Funktionen  $t_i \in T$ , so daß alle  $s_i$  in Zeit  $t_i$ ,  $1 \leq i \leq k$ , berechenbar sind. Da die Mengen  $M$ ,  $V$  und  $W$  endlich sind, benötigt  $R$  zur Durchführung von Schritt (1) Laufzeit

$$O\left(\sum_{i=1}^k t_i(x)\right)$$

und zur Durchführung von Schritt (2) konstante Laufzeit. Wegen der Eigenschaften von  $T$  gehört die Laufzeitfunktion  $t_R$  von  $R$  zu  $T$ . Die Maschine  $R$  gibt für Eingaben aus  $\Sigma^*$  nur die Zeichen  $\{0, 1, ?\}$  aus. Gibt  $R$  den Wert 1 aus, so existiert ein  $z \in V \cup W$  und eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion  $s_i \in M$  mit  $s_i(z) = s_i(x)$ . Da  $s_i$  aber eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion ist, folgt sofort, daß  $x \in L$  gilt. Die analoge Aussage gilt für den Fall, daß  $R$  den Wert 0 ausgibt. Ist  $(x, y) \in P_{f, L, \bar{L}}$  ein Konfliktpaar, so existiert nach Voraussetzung eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion  $s_i \in M$  und ein  $z \in V \cup W$  mit  $s_i(z) = s_i(x)$  oder  $s_i(z) = s_i(y)$ . Dann muß  $R$  aber für  $x$  bzw.  $y$  entscheiden können, ob  $x \in L$  oder  $y \in L$  gilt. Insgesamt folgt, daß  $f$  eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist. ■

Nun läßt sich Satz 4.28 zeigen:

**Beweis von Satz 4.28:** Die Eigenschaft einer Funktion, eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion, eine Beinahe-Reduktion oder eine chaotische Funktion zu sein, hängt nach Lemma 4.25 nur von der Sprache  $L$  und nicht von einem speziellen Lauf des obigen Algorithmus ab.

Die Menge aller deterministischen Turingmaschinen ist abzählbar. Die lexikographische Anordnung der Programme aller dieser Maschinen bezüglich einer festen universellen Turingmaschine definiert eine Aufzählung der Menge aller deterministischen Turingmaschinen. Somit existieren auch die Aufzählungen  $\{f_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  und  $\{g_j\}_{j \in \mathbb{N}_0}$ . Man erhält nämlich durch Streichen von Maschinen aus der Aufzählung der Menge aller deterministischen Turingmaschinen solche speziellen Aufzählungen. (Diese sind in der Regel aber keine *rekursiven* Aufzählungen.)

Wenn der Algorithmus die innere Repeat-Schleife verläßt, existieren stets geeignete  $x \in L$  und  $y \in \bar{L}$ , die die Bedingungen erfüllen. Der Beweis erfolgt durch Widerspruch: Angenommen für alle  $x \in L$  und für alle  $y \in \bar{L}$  können nicht alle Bedingungen in Schritt (8) gleichzeitig erfüllt werden, dann sind die Voraussetzungen von Lemma 4.29 erfüllt. Das heißt, daß die betrachtete Funktion  $f_i$  eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \bar{L})$  ist. Dies ist aber ein Widerspruch dazu, daß alle  $f_i$  chaotische Funktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  sind. ■

**Satz 4.30** Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache. Wenn der obige Algorithmus zwei unendliche Mengen  $A$  und  $B$  konstruiert, so ist  $(A, B)$  ein  $\mathcal{C}$ -biimmunes Paar von  $L$ .

**Beweis:** Es ist zu zeigen, daß alle  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(A, B)$  finite-one auf  $A \cup B$  sind. Sei  $f \in \text{Red}_T(A, B)$  beliebig. Es gibt nach Lemma 4.25 folgende Fälle:

1. Es gilt  $f \in \text{Red}_T(L, \overline{L})$ . Dann gibt es ein  $j \in \mathbb{N}_0$  mit  $f = g_j$ . Die Funktion  $g_j$  wird irgendwann in die Menge  $R$  aufgenommen. Angenommen,  $f$  ist nicht finite-one auf  $A \cup B$ . Das heißt, es gibt ein  $y \in \Sigma^*$  mit  $|f^{-1}(y) \cap (A \cup B)| = \infty$ . Nachdem die Funktion  $g_j$  in die Menge  $R$  aufgenommen wurde, müssen somit unendlich viele Elemente nach  $A \cup B$  aufgenommen werden, die das gleiche Bild unter  $g_j$  haben. Die Bedingungen, die an  $x$  und  $y$  gestellt werden, erzwingen, daß die Bilder von neu hinzugenommen Elementen verschieden sind von den Bildern aller schon vorher aufgenommenen Elemente. Somit tritt dieser Fall nie ein, und  $f$  ist finite-one auf  $A \cup B$ .
2. Es gilt:  $f$  ist eine Beinahe-Reduktion von  $(L, \overline{L})$ . Falls  $f$  nicht finite-one auf  $A \cup B$  ist, gibt es nach Satz 4.26 eine  $\mathcal{C}$ -Reduktion von  $(L, \overline{L})$ , die nicht finite-one auf  $A \cup B$  ist. Das ist aber ein Widerspruch zu Fall 1.
3. Es gilt:  $f \in \mathcal{C}\text{-Funk}_T(L, \overline{L})$ . Dann nimmt der Algorithmus aber Elemente nach  $A \cup B$  auf, so daß  $f \notin \text{Red}_T(A, B)$  folgt.

■

Es bleibt noch zu zeigen, daß der Algorithmus 4.27 zwei unendliche Mengen  $A$  und  $B$  konstruiert. Dazu benötigen wir folgenden Satz:

**Satz 4.31** Seien  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache,  $X \subseteq \Sigma^*$  eine endliche Menge. Wenn eine Beinahe-Reduktion  $f$  von  $(L, \overline{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  existiert mit  $|f(\Sigma^* \setminus X)| = 1$ , dann gilt  $L \in \mathcal{C}$ .

**Beweis:** Sei  $X$  eine endliche Menge und  $f$  eine Beinahe-Reduktion  $f$  von  $(L, \overline{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  mit  $|f(\Sigma^* \setminus X)| = 1$ . Dann existiert zu  $f$  eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine  $R$  mit den Eigenschaften aus Definition 4.24. Wir konstruieren eine deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschine, die  $L$  akzeptiert. Dazu unterscheiden wir folgende Fälle:

1. Es gibt ein  $x \in L \setminus X$  mit  $R(x) = ?$ , dann folgt für alle  $y \in \overline{L} \setminus X$ , daß  $R(y) = 0$  gilt. Sonst gäbe es ein Konfliktpaar  $(x, y)$  mit  $R(x) = R(y) = ?$ . Die Maschine  $M$ , die  $L$  entscheidet, arbeitet wie folgt: Bei Eingabe  $x \in \Sigma^*$  prüft  $M$  durch Nachschlagen in einer Tabelle, ob  $x \in X$  gilt. Ist  $x \notin X$ , so berechnet  $M$  den Wert  $R(x)$ . Ist  $R(x) = ?$ , so gibt  $M$  das Zeichen 1 aus, sonst das Zeichen  $R(x)$ . Ist  $x \in X$ , so bestimmt  $M$  durch eine Tabelle, ob  $x \in L$  gilt, und gibt das entsprechende Ergebnis aus.

2. Für alle  $x \in L \setminus X$  gilt  $R(x) = 1$ . Die Maschine  $M$ , die  $L$  entscheidet, arbeitet wie folgt: Bei Eingabe  $x \in \Sigma^*$  berechnet  $M$  den Wert  $R(x)$ . Gilt  $R(x) \neq ?$ , so gibt  $M$  das Zeichen  $R(x)$  aus. Falls  $R(x) = ?$  gilt, prüft  $M$  durch Nachschlagen in einer Tabelle, ob  $x \in X$  gilt. Ist  $x \notin X$ , so ist  $x \notin L$ , und  $M$  gibt das Zeichen 0 aus. Ist  $x \in X$ , dann bestimmt  $M$  durch eine Tabelle, ob  $x \in L$  gilt, und gibt das entsprechende Ergebnis aus. ■

**Satz 4.32** Sei  $L \subseteq \Sigma^*$  eine Sprache. Gilt  $L \notin \mathcal{C}$ , dann konstruiert der obige Algorithmus zwei unendliche Mengen  $A$  und  $B$ .

**Beweis:** Wir führen einen indirekten Beweis. Angenommen, es gilt  $|A| < \infty$ . Sei  $i_0 \geq 0$  der Wert, den die Variable  $i$  zu dem Zeitpunkt hat, von dem ab der Algorithmus die Menge  $A$  nicht mehr verändert. Man betrachte die unendliche Familie von Funktionen  $\{t_k\}_{k \in \mathbb{N}}$  von  $\Sigma^*$  nach  $\Sigma^*$ , die wie folgt definiert ist:

$$t_k(x) = \begin{cases} 1^{k+1} & \text{falls } x \in A, \\ 1 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Da  $A$  endlich ist, können die Funktionen  $t_k$ ,  $k \in \mathbb{N}$ , durch deterministische  $T$ -Zeit Turingmaschinen berechnet werden. Ferner gilt, daß die Funktionen  $t_k$  keine  $\mathcal{C}$ -Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  sind, sonst wäre  $L$  oder  $\bar{L}$  endlich und damit  $L \in \mathcal{C}$ . Weil  $|A| < \infty$  und  $L \notin \mathcal{C}$  gilt, folgt mit Satz 4.31, daß die Funktionen  $t_k$  keine Beinahe-Reduktionen von  $(L, \bar{L})$  bezüglich  $\mathcal{C}$  sind. Mit Lemma 4.25 folgt, daß

$$\{t_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subseteq \{f_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$$

gilt. Da  $\{f_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine Aufzählung aller Funktionen in  $\mathcal{C}\text{-Funk}_T(L, \bar{L})$  ist, gibt es ein  $s \geq i_0$  mit  $f_s \in \{t_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ . Offenbar gilt  $t_k(A) \cap t_k(\Sigma^* \setminus A) = \emptyset$  für alle  $k \in \mathbb{N}$ . Somit verläßt der Algorithmus die innere Repeat-Schleife, wenn die Variable  $i$  den Wert  $s$  annimmt. In Schritt (8) wird ein Paar  $x \in L$ ,  $y \in \bar{L}$  gewählt mit  $f_s(x) = f_s(y)$ . Nach Definition der Funktionen  $t_k$  folgt  $f_s(x) = 1 = f_s(y)$ . Daher ist  $x \notin A$  und somit wird in Schritt (9) das neue Element  $x$  in  $A$  aufgenommen. Dies ist ein Widerspruch zur Annahme. Daher folgt, daß  $A$  eine unendliche Menge ist.

Ebenso zeigt man, daß  $|B| = \infty$  gilt. ■

Wie wir im folgenden zeigen werden, gibt es auch Super Complexity Cores  $S$  zu einer Sprache  $L$  bezüglich einer rekursiv aufzählbaren, normalen Sprachklasse  $\mathcal{C}$ , die rekursiv sind. Unsere Konstruktion bedient sich der Technik, die wir zum Beweis der entsprechenden Aussage (vergleiche Beweis zu Satz 4.9) in der Theorie der Complexity Cores verwendet haben. Seien eine Sprachklasse  $\mathcal{C}$  und eine Sprache  $L \notin \mathcal{C}$  so gewählt, daß es ein Super Complexity Core  $S$  von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  gibt. Zunächst versuchen wir, das Problem der Konstruktion eines Super Complexity Cores "lokal" zu lösen: Betrachtet man nur eine endliche Menge  $M \subseteq \mathcal{C}$ , so gibt es sicher ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $M$ , nämlich wiederum  $S$ . In Anlehnung an

die Charakterisierung der Super Complexity Cores definieren wir sogenannte *Minicores* von  $L$  bezüglich  $M$ . Dabei handelt es sich um endliche Mengen, aus denen Super Complexity Cores konstruiert werden können. Dann konstruieren wir eine unendliche Folge  $\{M_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  solcher endlicher Mengen  $M_i \subseteq \mathcal{C}$  mit  $M_{i-1} \subseteq M_i$ ,  $i \geq 1$ , und

$$\bigcup_{i \in \mathbb{N}_0} M_i = \mathcal{C},$$

und parallel dazu konstruieren wir eine unendliche Folge von Minicores  $R_i$  von  $L$  bezüglich  $M_i$  für  $i \in \mathbb{N}$ . Es zeigt sich (vergleiche Lemma 4.36), daß dann  $\bigcup_{i \in \mathbb{N}} R_i$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist.

**Definition 4.33** Sei  $L \subseteq \Sigma^*$ . Sei  $M$  eine endliche Menge von Sprachen. Eine Menge  $R \subseteq \Sigma^*$  mit  $0 \neq |R| < \infty$  heißt *Minicore* von  $L$  bezüglich  $M$ , wenn für alle  $C \in M$  eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

1.  $C \cap R = \emptyset$ .
2.  $C \cap R \cap L \neq \emptyset$  und  $C \cap R \cap \bar{L} \neq \emptyset$ .

Wir geben zunächst einige einfach zu beweisende Eigenschaften von Minicores an.

**Lemma 4.34** Sei  $\mathcal{C}$  eine Klasse von Sprachen und  $L \notin \mathcal{C}$  eine Sprache.

1. Seien  $R, M_1, M_2 \subseteq \Sigma^*$  endliche Mengen. Gilt  $M_1 \subseteq M_2 \subseteq \mathcal{C}$  und ist  $R$  ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M_2$ , so ist  $R$  auch ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M_1$ .
2. Sei  $C \in \mathcal{C}$ , und sei  $M \subseteq \mathcal{C}$  eine endliche Menge und  $R$  ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M$  und seien  $x, y \in \Sigma^*$ . Gilt  $x \in C \cap L$  und  $y \in C \cap \bar{L}$ , und gilt für alle  $D \in M$  entweder  $D \cap R \neq \emptyset$  oder  $\chi_D(x) = \chi_D(y) = 0$ , so ist  $R \cup \{x, y\}$  ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M \cup \{C\}$ .
3. Ist  $M \subseteq \mathcal{C}$  eine endliche Menge und sind  $R_1, R_2 \subseteq \Sigma^*$  zwei Minicores von  $L$  bezüglich  $M$ , dann ist auch  $R_3 = R_1 \cup R_2$  ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M$ .

Zunächst müssen wir untersuchen, unter welchen Voraussetzungen solche Minicores existieren. Das nächste Lemma besagt, daß zu jeder endlichen Menge  $M \subseteq \mathcal{C}$  ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M$  existiert, wenn es ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  gibt.

**Satz 4.35** Seien  $N \in \mathbb{N}_0$ ,  $\{x_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine wiederholungsfreie Aufzählung von  $\Sigma^*$ ,  $\mathcal{C}$  eine unter endlicher Variation abgeschlossene Klasse von Sprachen,  $L \notin \mathcal{C}$  eine Sprache und  $S$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ . Sei weiter  $M \subseteq \mathcal{C}$  eine endliche Menge. Dann gibt es eine endliche Menge  $R \subseteq S \setminus \{x_n : n \leq N\}$ , die ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M$  ist.

**Beweis:** Sei  $H, C \subseteq \Sigma^*$ . Wir setzen

$$\mathcal{A}_C^H = C \cap H \cap L$$

und

$$\mathcal{B}_C^H = C \cap H \cap \bar{L}.$$

*Behauptung 1:*

Für alle  $C \in M$  gilt eine der beiden folgenden Aussagen:

1.  $|\mathcal{A}_C^S| < \infty$  und  $|\mathcal{B}_C^S| < \infty$ .
2.  $|\mathcal{A}_C^S| = \infty$  und  $|\mathcal{B}_C^S| = \infty$ .

Zum Beweis dieser Behauptung nehmen wir an, daß es ein  $C \in \mathcal{C}$  gibt mit o.B.d.A.  $|\mathcal{A}_C^S| < \infty$  und  $|\mathcal{B}_C^S| = \infty$ . Dann betrachten wir  $C' = C \setminus \mathcal{A}_C^S$ . Da  $\mathcal{C}$  unter endlicher Variation abgeschlossen ist, ist  $C' \in \mathcal{C}$ . Weiterhin gilt  $C' \cap S \cap L = \emptyset$  und

$$|C' \cap S \cap \bar{L}| = |C \cap S \cap \bar{L}| = \infty.$$

Also ist  $S$  kein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ . Dies ist ein Widerspruch zur Voraussetzung. Damit ist Behauptung 1 bewiesen.

Setze

$$T = \left( \{x_n : n \leq N\} \cup \bigcup_{\substack{C \in M \\ |\mathcal{A}_C^S| < \infty}} \mathcal{A}_C^S \cup \bigcup_{\substack{C \in M \\ |\mathcal{B}_C^S| < \infty}} \mathcal{B}_C^S \right)$$

und

$$S' = S \setminus T.$$

Dann ist  $T$  eine endliche Menge, und offenbar ist  $S'$  auch ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ .

Nach Wahl von  $S'$  und mittels Behauptung 1 folgt:

*Behauptung 2:*

Für alle  $C \in M$  gilt eine der beiden Aussagen:

1.  $|\mathcal{A}_C^{S'} \cup \mathcal{B}_C^{S'}| = 0$
2.  $|\mathcal{A}_C^{S'}| = \infty$  und  $|\mathcal{B}_C^{S'}| = \infty$ .

Sei  $M' = \{C \in M : |\mathcal{A}_C^{S'}| = \infty \text{ und } |\mathcal{B}_C^{S'}| = \infty\}$ . Dann gilt für alle  $C \in M \setminus M'$ :

$$C \cap S' = \emptyset.$$

Ist  $M' \neq \emptyset$ , so konstruiert man ein Minicore  $R$  wie folgt: Für alle  $C \in M'$  nimmt man zwei Strings  $x \in \mathcal{A}_C^{S'}$ ,  $y \in \mathcal{B}_C^{S'}$  in  $R$  auf. Ist dagegen  $M' = \emptyset$ , so setzen wir  $R = \{x_0\}$ . Dabei ist  $x_0$  das kleinste Element in  $S'$ .

Man sieht folgendermaßen, daß  $R$  ein Minicore ist: Offenbar ist  $R \neq \emptyset$ .

1. Fall: Ist die Menge  $M'$  nicht leer, so sei  $D \in M$  beliebig gewählt. Falls  $D \in M'$  gilt, gibt es  $x, y \in R$  mit  $(x, y) \in \mathcal{A}_D^{S'} \times \mathcal{B}_D^{S'}$ . Somit gilt  $D \cap R \cap L \neq \emptyset$  und  $D \cap R \cap \bar{L} \neq \emptyset$ .

Ist dagegen  $D \in M \setminus M'$ , so gilt nach Konstruktion für alle  $x \in R$ :  $D \cap R = \emptyset$ .

2. Fall: Ist  $M' = \emptyset$ , dann gilt für alle  $D \in M$ :

$$D \cap S' = \emptyset.$$

Somit gilt insbesondere für alle  $D \in M$  die Gleichung  $x_0 \notin D$ , und somit ist

$$D \cap R = \emptyset.$$

■

Die Konstruktion eines Super Complexity Cores kann nun mit Hilfe der durch das folgende Lemma beschriebenen lokalen Bestimmung von Minicores durchgeführt werden.

**Lemma 4.36** *Sei  $\mathcal{C}$  eine normale Klasse von Sprachen, sei  $L \notin \mathcal{C}$  eine rekursive Sprache, und sei  $\{M_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine Folge von endlichen Mengen aus  $\mathcal{C}$  mit  $M_0 = \emptyset$  und*

$$M_{i-1} \subseteq M_i$$

*für alle  $i \in \mathbb{N}$ , und sei  $\{R_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine Folge von Mengen aus  $\Sigma^*$ , für die gilt:  $R_i$  ist ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M_i$  für alle  $i \in \mathbb{N}$ .*

*Falls  $\bigcup_{i \in \mathbb{N}_0} M_i = \mathcal{C}$  gilt, ist  $S = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} R_i$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ .*

**Beweis:** Angenommen,  $S$  ist kein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ . Dann gibt es o.B.d.A. nach Satz 4.17 ein  $D \in \mathcal{C}$  mit  $D \cap S \cap L = \emptyset$  und  $|D \cap S| = \infty$ . Da  $\bigcup_{i \in \mathbb{N}_0} M_i = \mathcal{C}$  gilt, gibt es ein  $i \in \mathbb{N}$  mit  $D \notin M_{i-1}$  und  $D \in M_i$ . Nach Voraussetzung und nach Lemma 4.34 gilt für alle  $j \geq i$ , daß  $R_j$  ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M_i$  ist.

Da  $D \cap S \cap L = \emptyset$  gilt, folgt  $D \cap R_j \cap L = \emptyset$  für alle  $j \geq 1$ . Für  $j \geq i$  ist  $R_j$  aber ein Minicore von  $L$  bezüglich  $M_i$ . Somit ist insbesondere  $D \cap R_j = \emptyset$  für alle  $j \geq i$ . Daher ist

$$\begin{aligned} |D \cap S| &= \left| D \cap \bigcup_{j \geq 1} R_j \right| \\ &\leq \left| D \cap \bigcup_{j=1}^{i-1} R_j \right| + \left| D \cap \bigcup_{j \geq i} R_j \right| \\ &= \left| D \cap \bigcup_{j=1}^{i-1} R_j \right| \\ &< \infty. \end{aligned}$$

Dies ist ein Widerspruch. ■

Wir zeigen nun, daß es Super Complexity Cores gibt, die rekursive Sprachen sind.

**Satz 4.37** Ist  $\mathcal{C}$  eine rekursiv aufzählbare, normale Klasse von Sprachen und ist  $L$  eine rekursive Sprache mit  $L \notin \mathcal{C}$ , so gibt es ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ , das eine rekursive Sprache ist.

**Beweis:** Offenbar ist  $L \notin \mathcal{C}$ . Sei  $\{C_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine rekursive Aufzählung von  $\mathcal{C}$ , und sei  $\{x_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine wiederholungsfreie Aufzählung von  $\Sigma^*$ .

**Algorithmus 4.38**

<i>BEGIN</i>	(1)
Setze $S = \emptyset$ ; $M = \emptyset$ ; $n = 0$ ; $i = 0$ ;	(2)
<i>LOOP FOREVER</i>	(3)
Setze $M = M \cup \{C_i\}$ ; $T = \emptyset$ ;	(4)
<i>REPEAT</i>	(5)
Setze $T = T \cup \{x_n\}$ ; $n = n + 1$ ;	(6)
<i>UNTIL</i> es gibt ein Minicore $R \subseteq T$ von $L$ bezüglich $M$	(7)
Sei $R'$ das maximale Minicore von $L$ bezüglich $M$ mit $R' \subseteq T$ ;	(8)
Setze $S = S \cup R'$ ; $i = i + 1$ ;	(9)
<i>END</i>	(10)

Wir zeigen zunächst, daß die von obigem Algorithmus berechnete Menge  $S$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist:

Da nach Definition ein Minicore eine endliche nicht-leere Menge ist und nach Lemma 4.34 das maximale Minicore in Schritt (8) existiert und wohldefiniert ist, wächst jedesmal, wenn Schritt (9) durchlaufen wird, die Menge  $S$  um wenigstens ein Element. Zunächst zeigen wir, daß die Schleife von Schritt (5) bis Schritt (7) stets terminiert. Angenommen die Schleife terminiert für einen bestimmten Wert der Variablen  $M$  nicht. Sei  $N \in \mathbb{N}_0$  der Wert der Variable  $n$ , bevor die Schleife betreten wurde. Da normale Sprachklassen offenbar unter endlicher Variation abgeschlossen sind und daher nach Satz ?? ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  existiert, gibt es nach Satz 4.35 auch ein Minicore  $R$  von  $L$  bezüglich  $M$  mit  $R \cap \{x_n : n \leq N\} = \emptyset$ . Dann terminiert die Schleife aber im Widerspruch zur Annahme.

Aus Lemma 4.36 folgt, daß die unendliche konstruierte Menge  $S$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$  ist.

Es bleibt zu zeigen, daß diese Menge  $S$  eine rekursive Sprache ist. Dazu betrachtet man den Algorithmus, der bei Eingabe  $x = x_m$  mit  $m \in \mathbb{N}_0$  den Algorithmus 4.38 solange simuliert bis Schritt (9) erreicht wird und bis für die Variable  $n$  den Wert  $m$  überschritten hat. Ist dann  $x_m$  in der durch die Variable  $S$  repräsentierten Menge, so wird 1 ausgegeben, sonst 0. Bei der Simulation beachte man, daß sowohl der Test über die Existenz des Minicores in Schritt (7) als auch die Bestimmung des maximalen Minicores in Schritt (8) durch Ausprobieren aller Möglichkeiten für  $R$  bzw.  $R'$  durchgeführt werden kann.

Dieser Algorithmus erkennt offenbar  $S$ ! ■

#### 4.2.5 Ein Hierarchiesatz für $\overline{DTime}_\mu^R(T)$

Es ist nun mittels der Ergebnisse des vorangehenden Abschnitts möglich, einen zu Satz 4.11 analogen Hierarchiesatz für Sprachklassen vom Typ  $\overline{DTime}_\mu^R(T)$  mit  $T \subseteq \mathcal{F}$ ,  $\mu \in \mathcal{D}$  für ein schwaches average-case Modell  $R$  zu zeigen.

**Satz 4.39** *Sei  $\omega \in \Omega_R$ . Sei  $g \in H$  längenwachsend, sei  $h \in H$  längenwachsend und voll zeitkonstruierbar, und sei  $f : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $f \in H$ ,  $f(\cdot) \geq 2 \cdot |\cdot| + 6$ , eine längenwachsende, voll zeitkonstruierbare Funktion, die  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert. Gilt ferner*

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\widehat{f}(n) \cdot \log(\widehat{f}(n))}{\widehat{h}(n)} = 0,$$

so gibt es eine Dichte  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$ , so daß

$$\overline{DTime}_\mu^R(\{g\}) \subseteq \overline{DTime}_\mu^R(\{f\}) \subseteq \overline{DTime}_\mu^R(\{h\})$$

aber

$$\overline{DTime}_\mu^R(\{g\}) \neq \overline{DTime}_\mu^R(\{h\})$$

gilt.

**Beweis:** Der Beweis dieses Satzes verläuft ähnlich dem Beweis von Satz 4.11. Sei

$$L \in \overline{DTime}(\{\widehat{h}\}) \setminus \overline{DTime}(\{\widehat{f}\}).$$

Es genügt die folgende Behauptung zu zeigen:

*Behauptung:*

*Es gibt eine Dichte  $\mu \in \mathcal{D}_\omega$ , so daß alle deterministischen Turingmaschinen  $M$  mit*

$$L(M) \cap SUP(\mu) = L \cap SUP(\mu)$$

*auf fast allen Eingaben  $x \in SUP(\mu)$  mehr als  $f(x)$  Schritte machen.*

Wir beweisen nun die Behauptung: Sei  $\mathcal{C} = \overline{DTime}(O(\widehat{f}))$ . Nach dem Beschleunigungssatz 4.3 gilt dann  $\mathcal{C} = \overline{DTime}(\{\widehat{f}\})$ . Also ist  $L \notin \mathcal{C}$ .

Man sieht leicht, daß  $\mathcal{C}$  eine normale Sprachklasse ist. Aus Satz ?? folgt damit die Existenz eines Super Complexity Cores  $S$  von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C}$ . Wir setzen

$$\mu(x) = \begin{cases} \omega(|x|) \cdot \frac{c}{|S \cap \Sigma^{|x|}|} & \text{falls } x \in S, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

wobei  $c > 0$  die Normierungskonstante ist.

Nach Voraussetzung ist

$$L \in DTime(\{\hat{h}\}),$$

und somit gilt:

$$L \in \overline{DTime_{\mu}^R(\{h\})}.$$

Da  $S$  ein Super Complexity Core von  $L$  bezüglich  $\mathcal{C} = DTime(O(f))$  ist,  $R$  schwach antisymmetrisch bezüglich  $\omega$  ist und  $SUP(\mu) = S$  gilt, folgt

$$L \notin \overline{DTime_{\mu}^R(\{g\})}.$$

Damit ist der Satz bewiesen. ■

### 4.3 Beziehungen zwischen Komplexitätsmaßen

Wir betrachten wiederum nur schwache average-case Modelle  $R = (H, V)$ . Da jede Turingmaschine maximal soviele Bändeinheiten benutzt, wie sie Schritte in einer Berechnung macht, gilt infolge der Verträglichkeit und infolge der schwachen Transitivität der folgende Satz, der aussagt, daß auch im Modell  $R$  Berechnungen, die im Mittel Zeit  $g$  benötigen, auch nur mittleren Platz  $g$  verbrauchen. Man beachte, daß an dieser Stelle deutlich wird, daß das Verträglichkeitsaxiom und das schwache Transitivitätsaxiom wichtige Forderungen an "sinnvolle" Vergleichsmodelle sind.

**Satz 4.40** Für alle  $g \in H$  und alle  $\mu \in \mathcal{D}$  gilt

$$DTime_{\mu}^R(\{g\}) \subseteq DSpace_{\mu}^R(\{g\})$$

und

$$NTime_{\mu}^R(\{g\}) \subseteq NSpace_{\mu}^R(\{g\}).$$

Auch die Monotonie bezüglich Hintereinanderausführung stellt eine wichtige Anforderung an schwache average-case Modelle dar, wie der folgende Satz zeigt. Zu seinem Beweis benötigen wir offensichtlich diese Eigenschaft.

**Satz 4.41** Sei  $g \in H$  mit  $g(x) \geq \log_2(|x| + 1)$  für alle  $x \in \Sigma^*$ , und sei  $\mu \in \mathcal{D}$ . Dann gilt für alle

$$L \in DSpace_{\mu}^R(\{g\}),$$

daß es eine von  $L$  und  $R$  abhängige Konstante  $c > 0$  gibt, so daß

$$L \in DTime_{\mu}^R(\{2^{c \cdot g}\})$$

gilt.

**Beweis:** Sei

$$L \in DSpace_{\mu}^R(\{g\}),$$

und akzeptiere die deterministische  $k$ -Band Turingmaschine  $M_1$  die Sprache  $L$  in Platz  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$ . Da  $M_1$  deterministisch ist, ist die Zahl der möglichen Konfigurationen, die  $M_1$  während einer Berechnung bei Eingabe  $x$  annehmen kann, durch

$$c_1 \cdot (|x| + 2) \cdot (s(x))^k \cdot c_2^{k \cdot s(x)} \leq 2^{k' \cdot \max\{s(x), \log_2(|x|+1)\}}$$

begrenzt. Dabei ist  $c_1$  die Zahl der Zustände von  $M_1$ ,  $c_2$  die Zahl der Bandsymbole der Maschine und  $k'$  eine geeignete Konstante. Das Produkt auf der linken Seite der obigen Ungleichung setzt sich folgendermaßen zusammen: Eine Konfiguration wird eindeutig bestimmt durch den Zustand der Turingmaschine, durch die Stellung des Lesekopfes auf dem Read-only Eingabeband, durch die Stellungen der Bandköpfe auf den Arbeitsbändern und durch den Inhalt der Arbeitsbänder. Es gibt  $c_1$  verschiedene Zustände. Gemäß der Wahl des benutzten Turingmaschinen-Modells in Abschnitt 3.5 benutzt der Lesekopf auf dem Eingabeband nur die  $|x| + 1$  Bandeinheiten der Eingabe und des nächsten leeren Bandfeldes hinter der Eingabe. Da nur  $s(x)$  Bandeinheiten auf den Arbeitsbändern verwendet werden können, gibt es nur  $(s(x))^k$  viele Kombinationen für die Stellungen der Bandköpfe. Hat das Alphabet  $c_2$  Symbole (einschließlich #), so gibt es  $c_2^{k \cdot s(x)}$  mögliche Inhalte der Arbeitsbänder. Aus dem Produkt dieser Werte ergibt sich die Zahl möglicher Konfigurationen bei Eingabe  $x$ .

Die deterministische Turingmaschine  $M_2$  simuliert jeweils einen Schritt von  $M_1$ , notiert die neue Konfiguration  $I'$  und untersucht alle zuvor angenommenen Konfigurationen daraufhin, ob  $I'$  bereits angenommen wurde. In diesem Fall akzeptiert  $M_1$  nie, da sie sich in einer Endlosschleife befindet. Andernfalls simuliert  $M_2$  den nächsten Schritt. Da sich nach maximal

$$2^{O(\max\{s(x), \log_2(|x|+1)\})}$$

simulierten Schritten Konfigurationen wiederholen, benötigt die gesamte Berechnung durch die Maschine  $M_2$

$$2^{O(\max\{s(x), \log_2(|x|+1)\})}$$

mal die maximalen Kosten der Simulation eines Schrittes Zeit.

Die Simulation eines solchen Schrittes kostet erstens Zeit, um die neue Konfiguration  $I'$  von  $M_1$  zu bestimmen und zu notieren, und zweitens muß Zeit aufgewendet werden, um zu testen, ob  $I'$  bereits zuvor aufgetreten ist.

Beide Aufgaben können offenbar in Zeit

$$2^{c \cdot \max\{s(x), \log_2(|x|+1)\}}$$

durchgeführt werden für ein geeignetes  $c > 0$ . Ist  $s \leq_{\mu}^R g$ , dann folgt gemäß der Verträglichkeit, der Monotonie bezüglich Addition und bezüglich Komposition, daß

$$\max\{s(\cdot), \log_2(|\cdot| + 1)\} \leq_{\mu}^R 2 \cdot c_R \cdot g(\cdot),$$

wobei  $c_R$  die in der Definition 2.23 eingeführte zu  $R$  gehörende Konstante ist. Damit gilt

$$2^{c \cdot \max\{s(\cdot), \log_2(|\cdot|+1)\}} \leq_{\mu}^R 2^{2 \cdot c_R \cdot c \cdot g(\cdot)}.$$

■

Ebenso zeigt man den folgenden Satz:

**Satz 4.42** *Sei  $g \in H$  mit  $g(x) \geq \log_2(|x|+1)$  für alle  $x \in \Sigma^*$ , und sei  $\mu \in \mathcal{D}$ . Dann gilt für alle*

$$L \in NTime_{\mu}^R(\{g\}),$$

daß es eine von  $L$  und  $R$  abhängige Konstante  $c > 0$  gibt, so daß

$$L \in DTime_{\mu}^R(\{2^{c \cdot g}\})$$

gilt.

## 4.4 Der Satz von Savitch für schwache average-case Modelle

Wenn wir die Definitionen aus Abschnitt 3.5 zugrunde legen, können wir auch den wichtigen Satz von Savitch auf schwache average-case Modelle übertragen. Da die Aussage des Satzes 4.43 für den Beweis von Satz 4.44 nicht genügt, beweisen wir mit Satz 4.45 eine allgemeinere Version des Satzes von Savitch.

Folgende Version des Satzes von Savitch findet sich in [9].

**Satz 4.43 (Satz von Savitch)** *Sei  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  eine Funktion mit  $s(x) = s(y)$ , falls  $|x| = |y|$ , und  $s(x) \geq \log_2(|x|+1)$  für alle  $x \in \Sigma^*$ . Wird  $L$  von einer nichtdeterministischen Turingmaschine in Platz  $s$  akzeptiert und ist  $s$  voll bandkonstruierbar, so gibt es eine deterministische Turingmaschine, die  $L$  in Platz  $s^2$  akzeptiert.*

Ziel der nachstehenden Untersuchungen ist es, folgenden Satz zu beweisen:

**Satz 4.44** *Sei  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  eine Funktion, die  $s(x) \geq \log_2(|x|+1)$  für alle  $x \in \Sigma^*$  erfüllt. Dann gilt für alle  $\mu \in \mathcal{D}$*

$$NSpace_{\mu}^R(\{s\}) \subseteq DSpace_{\mu}^R(\{s^2\}).$$

Gegeben eine Sprache  $L \in NSpace_{\mu}^R(\{s\})$ , dann gibt es eine nichtdeterministische Turingmaschine  $M$ , die  $L$  in Platz  $p \leq_{\mu}^R s$  akzeptiert. Um jetzt den Satz von Savitch anwenden zu können, müßte bekannt sein, ob  $p$  voll bandkonstruierbar ist oder ob es eine Funktion  $p' \geq p$  gibt, die voll bandkonstruierbar ist und für die  $p' \leq_{\mu}^R s$  gilt. Diese Eigenschaft kann aber in der Regel nicht vorausgesetzt werden, denn abhängig von  $R$  gibt es sicher auch Funktionen  $p \leq_{\mu}^R s$ , für die an unendlich vielen Strings  $x \in \Sigma^*$  gilt:

$$p(x) > s(x).$$

Somit gelingt es nicht, Satz 4.43 anzuwenden, sogar dann nicht, wenn wir zusätzlich voraussetzen, daß  $s$  voll bandkonstruierbar ist.

Genau betrachtet, stört die Voraussetzung, daß  $s$  voll bandkonstruierbar sein muß, im Satz von Savitch. Wir zeigen daher, daß diese Voraussetzung nicht benötigt wird, wenn wir die Definitionen aus Abschnitt 3.5 unseren Untersuchungen zugrunde legen.

Dort haben wir definiert, daß eine nichtdeterministische Turingmaschine  $M$  genau dann  $s$ -platzbeschränkt ist, wenn für alle  $x \in \Sigma^*$  und alle möglichen Konfigurationsfolgen von  $M$  bei Eingabe  $x$  gilt, daß in diesen höchstens  $s(x)$  Bändeinheiten auf jedem Arbeitsband verwendet werden. Dies entspricht der Definition in [9].

**Satz 4.45 (Satz von Savitch, 2. Version)** *Sei  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}$  eine Funktion mit  $s(x) = s(y)$ , falls  $|x| = |y|$ , und  $s(x) \geq \log_2(|x| + 1)$  für alle  $x \in \Sigma^*$ . Wird  $L$  von einer nichtdeterministischen Turingmaschine in Platz  $s$  akzeptiert, so gibt es eine deterministische Turingmaschine, die  $L$  in Platz  $s^2$  akzeptiert.*

**Beweis:** Der Beweis beruht auf einer Modifikation des Beweises zum Satz 4.43. Sei  $M$  eine nichtdeterministische Turingmaschine, die  $L$  in Platz  $s$  akzeptiert.

Es gibt nur  $2^{c \cdot s(x)}$  Konfigurationen, die  $M$  bei Eingabe  $x$  annehmen kann, dabei ist  $c > 0$  eine geeignete Konstante, die von  $M$  abhängt. Diese Beobachtung haben wir bereits im Beweis von Satz 4.41 gemacht.

Wir geben nun einen Algorithmus an, der  $L$  in Platz  $O(s^2)$  akzeptiert:

## Algorithmus 4.46

<i>BEGIN</i>	(1)
Sei $I_0$ die Startkonfiguration von $M$ bei Eingabe $x$ ;	(2)
Setze $w = 1$ ; $ende = false$ ; $nextw = false$ ;	(3)
<i>REPEAT</i>	(4)
<i>FORALL</i> akzeptierende Haltekonfigurationen $I'$ mit Bandbedarf von maximal $w$ Bandeinheiten	(5)
<i>IF</i> $Test(I_0, I', w, c \cdot w) = true$	(6)
<i>THEN</i> Setze $accept = true$ ; $ende = true$ ;	(7)
<i>IF</i> $ende = false$	(8)
<i>THEN</i> <i>FORALL</i> Nichthaltekonfigurationen $I'$ mit Bandbedarf von genau $w + 1$ Bandeinheiten	(9)
<i>IF</i> $Test(I_0, I', w, c \cdot w) = true$	(10)
<i>THEN</i> $nextw = true$ ;	(11)
<i>IF</i> $nextw = true$	(12)
<i>THEN</i> $w = w + 1$ ; $nextw = false$ ;	(13)
<i>ELSE</i> $ende = true$ ;	(14)
<i>UNTIL</i> $ende = true$ ;	(15)
<i>IF</i> $accept = true$	(16)
<i>THEN</i> <i>RETURN</i> 1;	(17)
<i>ELSE</i> <i>RETURN</i> 0;	(18)
<i>END</i>	(19)

<i>PROCEDURE</i> $Test(I_1, I_2, p, i)$	(1)
<i>BEGIN</i>	(2)
<i>IF</i> Es gilt $i = 0$ und entweder ist $I_1 = I_2$ oder $I_1 \vdash I_2$	(3)
<i>THEN</i> <i>RETURN</i> $true$ ;	(4)
<i>IF</i> $i \geq 1$	(5)
<i>THEN</i> <i>FORALL</i> Nichthaltekonfigurationen $I'$ mit maximalem Bandbedarf $p$	(6)
<i>IF</i> $Test(I_1, I', p, i - 1) = true$ und $Test(I', I_2, p, i - 1) = true$	(7)
<i>THEN</i> <i>RETURN</i> $true$ ;	(8)
<i>RETURN</i> $false$ ;	(9)
<i>END</i> $Test$	(10)

Zunächst führen wir eine Schreibweise ein, die wir bereits im obigen Struktogramm verwendet haben:

Wir schreiben  $I_1 \vdash_k I_2$ , wenn es eine Folge von genau  $k$  Übergängen von  $I_1$  nach  $I_2$  gibt, bzw. auch  $\vdash$  statt  $\vdash_1$ .

*Behauptung 1:*

*Ein Aufruf der Prozedur Test der Form*

$$\text{Test}(I_1, I_2, p, i)$$

*terminiert stets und liefert genau dann true, wenn es eine Übergangsfolge von  $I_1$  nach  $I_2$  gibt, die maximal  $2^i$  Übergänge lang ist und während der keine Konfiguration auftritt, in der mehr als  $p$  Bandeinheiten verwendet werden.*

Dies kann man leicht durch Induktion über  $i$  beweisen:

Wenn es eine derartige Übergangsfolge tatsächlich gibt, gibt es für die rekursiven Aufrufe von Test jeweils eine entsprechende Wahl für die Variable  $I'$ . Ist die Übergangsfolge nicht genau  $2^i$  Schritte lang, so werden entsprechende viele Aufrufe der Form

$$\text{Test}(I', I', p, j)$$

nötig sein. Auf jeden Fall terminiert der Aufruf  $\text{Test}(I_1, I_2, p, i)$ , und es wird *true* ausgegeben.

Betrachten wir umgekehrt einen Aufruf der Form

$$\text{Test}(I_1, I_2, p, i).$$

Ist  $i = 0$ , so terminiert die Prozedur in jedem Fall, und es wird *true* genau dann ausgegeben, wenn  $I_1 = I_2$  oder  $I_1 \vdash I_2$  gilt. Das heißt, daß genau dann *true* ausgegeben wird, wenn es eine Übergangsfolge von  $I_1$  nach  $I_2$  von einer Länge von maximal  $2^0 = 1$  Schritten gibt und wenn in den Zwischenkonfigurationen nie mehr als  $p$  Bandeinheiten maximal verwendet werden.

Ist  $i \geq 1$ , so terminiert der Prozeduraufruf spätestens dann, wenn alle Prozeduraufrufe der Form  $\text{Test}(I_1, I', p, i-1)$  und  $\text{Test}(I', I_2, p, i-1)$  für alle Konfigurationen  $I'$ , die maximal  $p$  Bandeinheiten verwenden, abgearbeitet worden sind und jeweils selbst terminiert haben. Nach der Induktionsvoraussetzung trifft dies aber immer zu. Darüber hinaus gibt die Prozedur genau dann der Wert *true* zurück, wenn es eine solche Konfiguration  $I'$  gibt mit

$$\text{Test}(I_1, I', p, i-1) = \text{true}$$

und

$$\text{Test}(I', I_2, p, i-1) = \text{true}.$$

Nach Induktionsvoraussetzung gilt dann

$$I_1 \vdash_{2^{i-1}} I' \vdash_{2^{i-1}} I_2,$$

wobei in keiner Zwischenkonfiguration mehr als  $p$  Bandeinheiten benutzt werden. Somit gilt

$$I_1 \vdash_{2i} I_2,$$

und damit ist Behauptung 1 bewiesen.

*Behauptung 2:*

*Der Algorithmus akzeptiert die Sprache  $L$ .*

Der Bandbedarf für nichtdeterministische Turingmaschinen bei einer Eingabe  $x$  ist definiert als die maximal benötigte Zahl von benutzten Bandeinheiten auf einem der Bänder der Turingmaschine in einer Konfiguration, die von der Startkonfiguration aus *erreichbar* ist. *Erreichbar* ist eine Konfiguration  $I_2$  aus einer Konfiguration  $I_1$  genau dann, wenn es eine endliche Folge von Übergängen von  $I_1$  nach  $I_2$  gibt.

Der Rumpf des Algorithmus besteht nun darin, solange den Wert der Variablen  $w$  zu erhöhen, bis entweder eine von der Startkonfiguration aus erreichbare akzeptierende Haltekonfiguration mit einem Platzbedarf von  $w$  Bandeinheiten gibt oder es keine aus der Startkonfiguration aus erreichbaren Konfigurationen mit einem Platzbedarf von  $w + 1$  Bandeinheiten gibt. Man sieht leicht ein, daß es im letzteren Fall auch keine erreichbaren Konfigurationen mit Platzbedarf von mehr als  $w + 1$  Bandeinheiten gibt. Der Test, ob dies erfüllt ist, wird rekursiv mit Hilfe der Prozedur *Test* ausgeführt. Gibt es eine aus der Startkonfiguration erreichbare Haltekonfiguration mit Platzbedarf von  $w$  Bandeinheiten, so akzeptiert die nichtdeterministische Turingmaschine  $M$ , es gilt  $w \leq s(x)$  und auch der obige Algorithmus akzeptiert.

Somit ist die maximale Rekursionstiefe der Berechnung  $s(x)$ .

Wenn es eine erreichbare Konfiguration  $I'$  mit Platzbedarf  $w + 1$  gibt, dann gibt es eine Berechnung, die höchstens  $w$  Bandeinheiten benutzt und die zu  $I'$  führt. Insbesondere gibt es dann auch eine solche, die höchstens  $2^{c \cdot w}$  Übergänge benutzt. Also gilt  $\text{Test}(I_0, I', w, c \cdot w) = \text{true}$ .

Der Algorithmus bricht nur dann ab, wenn die Variable *ende* den Wert *true* annimmt. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn entweder eine akzeptierende Haltekonfiguration mit maximalem Bandbedarf von  $w$  Bandeinheiten pro Arbeitsband gefunden wurde oder wenn in allen Schleifendurchläufen der Schleife (8) bis (10) keine erreichbare Konfiguration mit Bandbedarf von genau  $w + 1$  Bandeinheiten gefunden wurde. Im ersten Fall wird 1 ausgegeben, im zweiten Fall 0, denn offenbar ist in diesem Fall  $w$  der maximale Bandbedarf bei der Berechnung von  $M$  bei Eingabe  $x$  und es gibt keine akzeptierende Haltekonfiguration mit maximaler Bandbelegung von  $w$  Bandeinheiten pro Arbeitsband.

Damit ist die Behauptung, daß der Algorithmus  $\chi_L(x)$  liefert, bewiesen.

*Behauptung 3:*

*Der obige Algorithmus benötigt maximal  $O(s^2)$  Bandeinheiten.*

Im wesentlichen wird nur Platz zum Speichern der Variablenwerte des aktuellen Aufrufs der Prozedur *Test* benötigt, bevor rekursiv die Prozedur *Test* wieder aufgerufen wird. Da die Rekursionstiefe bei Eingabe  $x$  durch  $s(x)$  beschränkt ist und zum

Speichern der Variablenwerte, wie wir unten zeigen werden,  $O(s(x))$  Platz nötig ist, ist damit der Platzbedarf durch

$$O(s^2)$$

beschränkt. Wir zeigen diese Behauptung im folgenden genauer:

Sei  $sp(i, p)$  der maximale Platzbedarf der Prozedur Test beim Aufruf  $\text{Test}(I_1, I_2, p, i)$ , wobei  $I_1, I_2$  irgendwelche Konfigurationen sind. Sei  $d$  die Anzahl der Zustände der Maschine. Wir zeigen durch Induktion, daß der Aufruf  $\text{Test}(I_1, I_2, p, i)$  einen maximalen Platzbedarf von

$$sp(i, p) = c \cdot \max\{(2 \cdot k + 1) \cdot p, \log_2(|x| + 2), \log_2(i), 3 + d\} \cdot i$$

für eine Konstante  $c \geq 4$  hat. Man beachte dabei, daß wir den Platz zum Speichern von  $I_1$  und  $I_2$  hier nicht dazurechnen.

Für  $i = 0$  ist  $sp(0, p)$  konstant, da der Test, ob  $I_1 = I_2$  oder  $I_1 \vdash I_2$  gilt, in konstantem Platz mit Hilfe der Übergangstabelle der Maschine  $M$  durchgeführt werden kann.

Sei  $i \geq 1$ , dann wird Platz für folgende Aufgaben benötigt:

1. Speichern von Kontrollinformationen über das gerade bearbeitete  $I'$ ,
2. Speichern von  $i$ ,
3. Speichern von  $p$ ,
4. Nacheinander Berechnen von  $\text{Test}(I_1, I', p, i - 1)$  und  $\text{Test}(I', I_2, p, i - 1)$ .

Da die verschiedenen Test-Aufrufe auf den gleichen Bändeinheiten durchgeführt werden können, wird für die letzte Aufgabe nur Platz  $sp(i - 1, p)$  benötigt. Die gerade bearbeitete Konfiguration  $I'$  besteht aus den Bandinhalten, dem Zustand und den Positionen der Bandköpfe auf den  $k + 1$  Bändern. Auf allen Arbeitsbändern werden maximal  $p$  Bändeinheiten und auf dem Eingabeband maximal  $|x| + 2$  Bändeinheiten benutzt. Da aber sowieso nur Konfigurationen verwendet werden, die auf dem Eingabeband  $x$  haben, genügt es, die Information über die Stellung des Bandkopfes für dieses Band zu speichern. Es ergibt sich folgender Platzbedarf zum Speichern der Information über  $I'$ :

$$d + k \cdot p + k \cdot \lceil \log_2 p \rceil + \lceil \log_2(|x| + 2) \rceil \leq 2 \cdot k \cdot p + \log_2(|x| + 2) + 1 + d.$$

Dazu kommt noch der Platzbedarf zum Speichern von  $i$  und  $p$ . Damit ergibt sich

$$\begin{aligned} sp(i, p) &\leq 2 \cdot k \cdot p + \log_2(|x| + 2) + 1 + d + \log_2(i) + 1 + \log_2(p) + 1 + sp(i - 1, p) \\ &\leq (2 \cdot k + 1) \cdot p + \log_2(|x| + 2) + 3 + d + \log_2(i) + sp(i - 1, p) \\ &\leq 4 \cdot \max\{(2 \cdot k + 1) \cdot p, \log_2(|x| + 2), \log_2(i), 3 + d\} + sp(i - 1, p). \end{aligned}$$

Benutzt man nun die Induktionsannahme, so folgt

$$\begin{aligned} sp(i, p) &\leq 4 \cdot \max\{(2 \cdot k + 1) \cdot p, \log_2(|x| + 2), \log_2(i), 3 + d\} \\ &\quad + c \cdot \max\{(2 \cdot k + 1) \cdot p, \log_2(|x| + 2), \log_2(i), 3 + d\} \cdot (i - 1) \\ &\leq c \cdot \max\{(2 \cdot k + 1) \cdot p, \log_2(|x| + 2), \log_2(i), 3 + d\} \cdot i. \end{aligned}$$

Damit ist die Induktionsbehauptung bewiesen.

Im Hauptprogramm wird Platz zum Speichern einer festen Zahl von Kontrollbits, Platz zum Speichern der aktuellen Konfiguration  $I'$  und Platz für den Aufruf der Prozedur Test benötigt. Dabei beachte man, daß keine Konfigurationen auftreten, die mehr als  $w = s(x)$  Bandeinheiten auf einem der Arbeitsbänder benutzen. Daraus ergibt sich ein Platzbedarf von

$$\begin{aligned}
& e + k \cdot \log_2(w + 1) + k \cdot w + \log_2(|x| + 2) + 1 + sp(c \cdot w, w) \\
\leq & e + k \cdot \log_2(w + 1) + k \cdot w + \log_2(|x| + 2) + 1 + \\
& c \cdot \max\{(2 \cdot k + 1) \cdot w, \log_2(|x| + 2), \log_2(c \cdot w), 3 + d\} \cdot c \cdot w \\
\leq & e + c \cdot \max\{(2 \cdot k + 1) \cdot w, \log_2(|x| + 2), \log_2(c \cdot w), 3 + d\} \cdot (c \cdot w + 1) \\
\leq & f \cdot \max\{w, \log_2(|x| + 2)\} \cdot w \\
\leq & f \cdot \max\{w, \log_2(|x| + 2)\}^2
\end{aligned}$$

für geeignete Konstanten  $e, f > 1$ , denn  $c$  ist eine Konstante. Gemäß dem Bandkompressionssatz 4.1 gibt es dann eine deterministische Turingmaschine, die  $L$  in Platz  $s^2$  akzeptiert.

Daraus folgt die behauptete Aussage über den Platzbedarf des Algorithmus, und der Satz ist bewiesen.  $\blacksquare$

Wir können nun Satz 4.44 beweisen:

**Beweis von Satz 4.44:** Sei  $L \in NSpace_{\mu}^R(\{s\})$ . Dann gibt es eine nichtdeterministische Turingmaschine  $M_1$ , die  $L$  in Platz  $p \in \mathcal{F}$  mit

$$p \leq_{\mu}^R s$$

akzeptiert. Aus Satz 4.45 ergibt sich, daß es eine deterministische Turingmaschine  $M_2$  gibt, die  $L$  in Platz

$$\max\{p, \log_2(|\cdot| + 1)\}^2$$

akzeptiert. Damit akzeptiert  $M_2$  die Sprache  $L$  ebenso in Platz

$$p^2 + (\log_2(|\cdot| + 1))^2.$$

Gemäß dem Bandkompressionssatz 4.1 gibt es dann auch eine deterministische Turingmaschine  $M_3$ , die  $L$  in Platz

$$\max\left\{1, \left\lceil \frac{p^2 + (\log_2(|\cdot| + 1))^2}{4 \cdot c_R^2} \right\rceil\right\} \leq \frac{p^2 + (\log_2(|\cdot| + 1))^2}{4 \cdot c_R^2} + 1$$

akzeptiert. Mit Hilfe der schwachen Monotonie bezüglich Addition, der Verträglichkeit und der Monotonie bezüglich Komposition folgt

$$\frac{p^2 + (\log_2(|\cdot| + 1))^2}{4 \cdot c_R^2} \leq_{\mu}^R c_R \cdot \frac{s^2 + s^2}{4 \cdot c_R^2} = \frac{1}{2 \cdot c_R} \cdot s^2,$$

und es gilt

$$\frac{p^2 + (\log_2(|\cdot| + 1))^2}{4 \cdot c_R^2} + 1 \leq_{\mu}^R c_R \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot c_R} \cdot s^2 + 1\right) \leq_{\mu}^R s^2,$$

da  $\frac{1}{2} \cdot s^2(x) + c_R \leq s^2(x)$  für fast alle  $x \in \Sigma^*$  gilt. Damit ist der Satz 4.44 bewiesen. ■

Zum Beweis des obigen Satzes ist unbedingt notwendig, daß es eine obere Schranke für den Platzbedarf aller möglichen Berechnungen der nichtdeterministischen Turingmaschine gibt. Dies wird durch die von uns verwendete Definition des Begriffs der Platzbeschränktheit bei nichtdeterministischen Turingmaschinen garantiert.

Eine ebenfalls häufig in der Literatur verwendete Definition für diesen Begriff lautet wie folgt:

Sei  $s : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{N}_0$ . Eine nichtdeterministische Turingmaschine akzeptiert eine Sprache  $L$  *schwach  $s$ -platzbeschränkt*, wenn für alle  $x \in L$  eine akzeptierende Berechnung existiert, während der maximal  $s(x)$  Bandeinheiten auf jedem Arbeitsband benutzt werden.

Der Unterschied zu der in Abschnitt 3.5 gegebenen Definition besteht darin, daß an den Platzbedarf bei Berechnungen bei Eingaben  $x \notin L$  im Fall der schwachen Platzbeschränktheit keine Bedingungen gestellt werden.

Die in Satz 4.43 vorgestellte Version des Satzes von Savitch gilt ebenfalls für Sprachen  $L$ , die von einer schwach  $s$ -platzbeschränkten nichtdeterministischen Turingmaschine  $M$  akzeptiert werden. Die Version in Satz 4.45 und damit auch Satz 4.44 können wir nur für das eingeschränkte Modell aus Abschnitt 3.5 zeigen, also für Sprachen, die von einer  $s$ -platzbeschränkten nichtdeterministischen Turingmaschine akzeptiert werden.

Allerdings verliert der Satz von Savitch nicht wirklich an Aussagekraft, wenn man den eingeschränkten Platzbeschränktheits-Begriff bei nichtdeterministischen Turingmaschinen verwendet. Betrachtet man nämlich eine Sprache  $L$ , die von einer schwach  $s$ -platzbeschränkten nichtdeterministischen Turingmaschine  $M_1$  akzeptiert wird, wobei  $s$  voll platzkonstruierbar ist (vergleiche die Voraussetzungen von Satz 4.43), dann wird  $L$  auch von einer  $s$ -platzbeschränkten nichtdeterministischen Turingmaschine  $M_2$  akzeptiert. Die Turingmaschine  $M_2$  berechnet nämlich bei Eingabe  $x$  den Wert  $s(x)$  und markiert auf allen Arbeitsbändern die ersten  $s(x)$  Bandfelder. Dann rechnet  $M_2$  wie  $M_1$ . Immer wenn sie dabei auf einem Arbeitsband diese markierte Bandeinheit zu überschreiten droht, gibt  $M_2$  den Wert 0 aus und stoppt. Tritt dieser Fall nicht ein, so wird genau die Berechnung von  $M_1$  durchgeführt.

## 4.5 Verhältnis zur worst-case Theorie

Eine in der Literatur für das Levinsche Modell diskutierte Frage ist: Sind alle  $\mathcal{NP}$ -Sprachen  $L$  bezüglich aller in P-Zeit approximierbaren Dichten in mittlerer P-Zeit deterministisch berechenbar, d.h. gilt für  $D = \text{Vapprox}(\text{Pol}, \mathcal{F})$

$$\mathcal{NP} \subseteq D\text{Time}_D^{\mathcal{L}}(\text{Pol})?$$

Diese Frage hat zum Beispiel in der Kryptographie praktische Bedeutung.

Da sich diese Frage zur Zeit genauso wenig beantworten läßt wie die Frage, ob  $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$  gilt, versucht man das obige Problem auf die Fragestellung  $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$  zu

reduzieren. Dies war bisher im Levinschen Modell nicht möglich. In [1] wird jedoch gezeigt, daß aus  $\mathcal{NP} \subseteq DTime_D^c(Pol)$  mit  $D = Vapprox(Pol, \mathcal{F})$  im Levinschen Modell folgt, daß  $DExpTime = NExpTime$  in der worst-case Komplexitätstheorie gilt. Wir zeigen im folgenden, daß diese Beziehung für eine Reihe von schwachen average-case Modellen gilt. Dabei verallgemeinern wir zum Beweis von Satz 4.48 die Technik des entsprechenden Beweises in [1].

Wir setzen

$$AverageP^R = DTime_D^R(Pol)$$

mit  $D = Vapprox(Pol, \mathcal{F})$ .

**Lemma 4.47** *Sei  $R = (H, V)$  ein schwaches average-case Modell, das die polynomielle Dominanzeigenschaft hat, und zu dem es ein  $\omega \in \Omega_R$  derart gibt, daß es zu allen  $p \in Pol$  eine Funktion  $f \in Pol \cap H$  gibt, die  $p$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert. Sei  $g \in \mathcal{F}$ . Sei  $c > 0$  und  $\gamma \in \mathcal{D}$  eine Dichte mit*

$$\gamma(x) \geq \frac{1}{|x|^c} \text{ oder } \gamma(x) = 0$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ . Falls es ein  $r \in \mathbb{N}$  mit

$$g \leq_\gamma^R |\cdot|^r$$

gibt, so gibt es ein  $t > 0$  mit  $g \leq_{SUP(\gamma)} |\cdot|^t$ , d.h.  $g$  ist polynomiell beschränkt auf  $SUP(\gamma)$ .

**Beweis:** Nach Voraussetzung gibt es ein  $\omega \in \Omega_R$ , so daß zu allen  $p \in Pol$  ein  $f \in Pol \cap H$  existiert, das  $p$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert.

Falls die Funktion  $g$  nicht polynomiell beschränkt ist, gibt es eine unendliche Folge  $\{x_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  von Elementen  $x_i \in SUP(\gamma)$  wachsender Länge, so daß  $g(x_i) > |x_i|^i$  gilt. Setze nun

$$\mu(x) = \begin{cases} d \cdot \omega(|x_i|) & \text{falls } x = x_i, i \in \mathbb{N}, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

wobei  $d$  die Normierungskonstante und  $\omega$  obige Dichte auf  $\mathbb{N}_0$  ist.

Sei  $g \leq_\gamma^R |\cdot|^r$  für ein  $r > 0$ . Alle Dichten  $\tau$  mit  $SUP(\tau) \subseteq SUP(\gamma)$  werden von  $\gamma$  polynomiell begrenzt, denn nach Voraussetzung gilt für alle  $x \in \Sigma^*$ :

$$|x|^c \cdot \gamma(x) = 0 \text{ oder } |x|^c \cdot \gamma(x) \geq 1.$$

Daher ist für alle  $x$  mit  $\tau(x) > 0$  auch  $\gamma(x) > 0$ , und es gilt

$$\tau(x) \leq 1 \leq |x|^c \cdot \gamma(x).$$

Ebenso gilt für alle  $x$  mit  $\tau(x) = 0$  diese Ungleichung. Daraus folgt, daß  $\gamma$  die Dichte  $\tau$  polynomiell begrenzt.

Da darüber hinaus  $R$  die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz hat und  $g \leq_\gamma^R |\cdot|^r$  gilt, folgt, daß es insbesondere zu  $\mu$  ein  $s \geq 1$  gibt mit

$$g \leq_\mu^R |\cdot|^s. \tag{4.4}$$

Nach Wahl von  $\omega$  wird  $|\cdot|^s$  von einer Funktion  $|\cdot|^{s'} \in H$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert, d.h. es gilt

$$|\cdot|^{s'} \not\leq_{\mu}^R |\cdot|^s,$$

da  $\mu \in \mathcal{D}_{\omega}$  gilt.

Da ferner  $|\cdot|^{s'} \leq_{SUP(\mu)} g$  gilt, folgt nach Lemma 2.24, daß

$$g \not\leq_{\mu}^R |\cdot|^s$$

gilt.

Dies ist ein Widerspruch zu Ungleichung (4.4). Daher ist  $g$  polynomiell beschränkt auf  $SUP(\gamma)$ . ■

Wir kommen nun zu dem angekündigten Satz über den Zusammenhang zwischen worst-case und average-case Theorie.

**Satz 4.48** Sei  $R = (H, V)$  ein schwaches average-case Modell, das die polynomielle Dominanzeigenschaft hat, und zu der es ein  $\omega \in \Omega_R$  derart gibt, daß es zu allen  $g \in Pol$  eine Funktion  $f \in Pol \cap H$  gibt, die  $g$  bezüglich  $R$  und  $\omega$  dominiert.

Ist

$$\mathcal{NP} \subseteq AverageP^R,$$

dann ist

$$DExpTime = NExpTime.$$

**Beweis:** Sei  $L \in NExpTime$ ,  $M$  eine nichtdeterministische Turingmaschine, die  $L$  in Zeit  $2^{s|\cdot|}$  für ein  $s \in \mathbb{N}$  akzeptiert, und  $\phi$  die Standardaufzählung von  $\Sigma^* = \{0, 1\}^*$ . Setze

$$T = \{1^n : n = \phi(x), x \in L\}$$

und

$$\gamma(x) = \begin{cases} \frac{c}{n^2} & \text{für } x = 1^n, n \in \mathbb{N}, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dabei ist  $c$  die Normierungskonstante. Dann ist  $\gamma \in Vapprox(Pol, \mathcal{F})$  und  $T \in \mathcal{NP}$ , denn folgende nichtdeterministische Turingmaschine  $M'$  akzeptiert  $T$ : Bei einer Eingabe  $y \notin \{1\}^*$  wird 0 ausgegeben, da offenbar  $y \notin T$  gilt. Andernfalls ist  $y = 1^k$  für  $k = |y|$ , und es wird  $x = \phi^{-1}(k)$  berechnet. Nach Definition der Standardaufzählung  $\phi$  von  $\Sigma^*$  gilt für  $x \in \Sigma^*$

$$2^{|x|+1} - 2 \geq \phi(x) \geq 2^{|x|} - 1.$$

Daher folgt

$$|y| \geq 2^{|x|} - 1.$$

Da  $\phi^{-1}$  in P-Zeit berechnet werden kann, gibt es ein  $t \in \mathbb{N}$ , so daß zum Berechnen von  $\phi^{-1}(|y|)$  maximal  $|y|^t + t$  Schritte nötig sind.

Nach der Berechnung von  $x$  wird ein akzeptierender Berechnungspfad der Maschine  $M$  bei Eingabe von  $x$  geraten und verifiziert, wenn ein solcher existiert. Dazu

sind nach Voraussetzung  $O(2^{s \cdot |x|}) = O(|y|^{2 \cdot s})$  Schritte nötig. Somit ist  $M'$  eine nichtdeterministische Turingmaschine mit polynomiell beschränkter Laufzeit. Da  $T \in \mathcal{NP}$  gilt, gibt es nach Voraussetzung eine deterministische Turingmaschine  $E$  mit Laufzeit  $t \in \text{Pol}_\gamma^R$ , die  $T$  akzeptiert. Gemäß dem vorangegangenen Lemma ist dann  $t$  polynomiell beschränkt auf  $\text{SUP}(\gamma)$ , d.h. es gibt ein  $r > 0$ , so daß

$$t \leq \text{SUP}(\gamma) \mid \cdot \mid^r$$

gilt. Folgende deterministische Turingmaschine  $A$  entscheidet dann  $L$  in exponentieller Zeit: Bei Eingabe  $x$  berechnet  $A$  den Wert  $\phi(x)$  und startet die Maschine  $E$  mit der Eingabe  $1^{\phi(x)}$ . Offensichtlich akzeptiert  $A$  eine Eingabe  $x$  genau dann, wenn  $1^{\phi(x)} \in T$  gilt. Dies ist aber genau dann der Fall, wenn  $x \in L$  gilt. Da  $1^{\phi(x)} \in \text{SUP}(\gamma)$  gilt, folgt für alle  $x \in \Sigma^*$

$$t(1^{\phi(x)}) \leq \phi(x)^r \leq (2^{|x|+1})^r = 2^{O(|x|)}.$$

Damit ist die gesamte Laufzeit zum Erkennen von  $L$  exponentiell beschränkt. Daraus folgt die Behauptung. ■

**Korollar 4.49** *Ist  $R$  das erweiterte Levinsche, das PolySum2- oder das FU-Modell, so gilt:*

*Ist*

$$\mathcal{NP} \subseteq \text{AverageP}^R,$$

*dann ist*

$$\text{DExpTime} = \text{NExpTime}.$$

**Beweis:** Mit Hilfe der im ersten und zweiten Kapitel gezeigten Sätze über die Eigenschaften dieser average-case Modelle (vergleiche Satz 2.37, Satz 2.26, Korollar 2.34 und Satz 3.10), läßt sich zeigen, daß die Bedingungen an  $R$  im obigen Satz für diese average-case Modelle erfüllt sind. ■

## Kapitel 5

# Vollständigkeitstheorie

In Anlehnung an das aus der klassischen Komplexitätstheorie bekannte Problem, ob die Sprachklassen  $\mathcal{NP}$  und  $\mathcal{P}$  übereinstimmen, stellt sich in jedem schwachen average-case Modell die Frage, ob es eine  $\mathcal{NP}$ -Sprache und eine Dichte gibt, so daß diese Sprache *nicht* durch eine deterministische Turingmaschine in mittlerer polynomieller Zeit bezüglich dieser Dichte und diesem schwachen average-case Modell erkannt werden kann. Eine positive Antwort auf diese Frage in irgendeinem schwachen average-case Modell würde (wegen der Verträglichkeitseigenschaft) bedeuten, daß  $\mathcal{NP} \neq \mathcal{P}$  gilt.

In der klassischen Komplexitätstheorie ist es gelungen, Sprachen  $L \in \mathcal{NP}$  zu finden, für die  $L \in \mathcal{P}$  genau dann gilt, wenn  $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$  gilt, nämlich die  $\mathcal{NP}$ -vollständigen Sprachen. Daher liegt es nahe, eine solche Vollständigkeitstheorie auch für schwache average-case Modelle zu entwickeln.

Im Levinschen Modell wurde untersucht, ob es eine  $\mathcal{NP}$ -Sprache  $L$  und eine Dichte  $\mu$  aus einer gegebenen Menge  $D \subseteq \mathcal{D}$  gibt, so daß das Paar  $(L, \mu)$  nur dann in mittlerer P-Zeit lösbar ist, wenn alle Paare  $(L', \gamma)$  mit  $L' \in \mathcal{NP}$  und  $\gamma \in D$  in mittlerer P-Zeit lösbar sind. In [11] zeigt L. Levin, daß es *vollständige* Probleme in  $DistNP$  gibt. Dabei ist  $DistNP$  die Menge der Paaren  $(L, \mu)$ , wobei  $L \in \mathcal{NP}$  und  $\mu$  eine Dichte ist, deren zugehörige Verteilung in P-Zeit berechenbar ist.

Wir zeigen im folgenden ähnliche Resultate, die nicht nur für das Levinsche Modell gelten, sondern auch für das PolySum2-Modell und das  $\mathcal{FU}$ -Modell. Wir führen dazu zunächst den Begriff der *Polynomzeitreduktion bezüglich eines Vergleichsmodells*  $R$  ein und zeigen, daß dieser die Eigenschaften hat, die man von einem Reduktionsbegriff erwartet. Dazu gehört unter anderem die Eigenschaft, daß zwei hintereinander ausgeführte Reduktionen wieder eine Reduktion ergeben. Der ursprünglich in der Levinschen Theorie entwickelte Reduktionsbegriff hatte diese Eigenschaft nicht. Unabhängig von unseren Ergebnissen wurde von Y. Gurevich und A. Blass in [4] ein Reduktionsbegriff für das Levinsche Modell entwickelt, der diese Transitivitätseigenschaft hat.

## 5.1 Polynomzeitreduktionen

Wir kommen zunächst zur Definition von Polynomzeitreduktionen bezüglich schwacher average-case Modelle.

**Definition 5.1** Sei  $R$  ein schwaches average-case Modell. Seien  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ ,  $\mu_1, \mu_2 \in \mathcal{D}$ ,  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$ . Dann heißt  $f$  Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$  von  $(L_1, \mu_1)$  auf  $(L_2, \mu_2)$ , wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt  $f(x) \in L_2$  genau dann, wenn  $x \in L_1$ .
2. Es gibt eine deterministische Turingmaschine  $M$ , die  $f$  in Zeit  $t$  berechnet, wobei  $t \in \text{Pol}_{\mu_1}^R$ .
3. Für alle  $h \in \mathcal{F}$ ,  $g \in H$  mit  $h \leq_{\mu_2}^R g$  gilt

$$h \circ f \in P(g)_{\mu_1}^R.$$

Ist  $\mathcal{C}$  eine P-abgeschlossene Klasse von Laufzeitfunktionen wie zum Beispiel die Menge der Polynome, der Exponentialfunktionen oder der Logarithmusfunktionen (siehe Abschnitt 3.3), so stellt die dritte Bedingung in der Definition von Polynomzeitreduktionen bezüglich  $R$  sicher, daß  $(L_2, \mu_2)$  in mittlerer  $\mathcal{C}$ -Zeit erkannt wird, wenn  $(L_1, \mu_1)$  in mittlerer  $\mathcal{C}$ -Zeit erkannt wird.

**Satz 5.2** Ist  $C \subseteq \mathcal{F}$  eine P-abgeschlossene Menge und ist  $\text{Pol} \subseteq C$ , so gilt:

Ist  $f$  eine Polynomzeitreduktion von  $(L_1, \mu_1)$  auf  $(L_2, \mu_2)$  und gilt

$$L_2 \in \text{DTime}_{\mu_2}^R(C),$$

so ist

$$L_1 \in \text{DTime}_{\mu_1}^R(C).$$

**Beweis:** Die deterministische Turingmaschine zum Erkennen von  $L_1$  berechnet  $f(x)$  bei Eingabe  $x$  und startet die Maschine  $M$  zum Erkennen von  $L_2$  mit der Eingabe  $f(x)$ . Hat die Turingmaschine für die Berechnung von  $f$  die Laufzeit  $t_1$  und die Turingmaschine zum Erkennen von  $L_2$  die Laufzeit  $t_2$ , dann ergibt sich die Laufzeit

$$t_1(x) + t_2(f(x))$$

zum Erkennen von  $L_1$ . Es ist  $t_2 \in C_{\mu_2}^R = P(C)_{\mu_2}^R$ , da  $C$  eine P-abgeschlossene Menge ist. Damit ist gemäß den Eigenschaften der Polynomzeitreduktion  $f$

$$t_2 \circ f \in P(C)_{\mu_1}^R = C_{\mu_1}^R.$$

Weiter ist

$$t_1 \in \text{Pol}_{\mu_1}^R \subseteq C_{\mu_1}^R.$$

Daraus folgt mittels der schwachen Monotonie bezüglich Addition die Behauptung. ■

In Abschnitt 3.3 haben wir gezeigt, daß die Mengen  $\text{Pol}$ ,  $\text{Exp}$  und  $\text{Log}$  P-abgeschlossen sind. Daraus folgt das nächste Korollar.

**Korollar 5.3** Für  $C \in \{Pol, Exp, Log\}$  gilt die Aussage des obigen Satzes.

Wir zeigen im folgenden Lemma, daß die Reduzierbarkeit unter der obigen Definition transitiv ist.

**Lemma 5.4** Ist  $f$  eine Polynomzeitreduktion von  $(L_1, \mu_1)$  auf  $(L_2, \mu_2)$ , und ist  $t$  eine Polynomzeitreduktion von  $(L_2, \mu_2)$  auf  $(L_3, \mu_3)$ , so ist  $t \circ f$  eine Polynomzeitreduktion von  $(L_1, \mu_1)$  auf  $(L_3, \mu_3)$ .

**Beweis:** Es gilt

$$t(f(x)) \in L_3 \iff f(x) \in L_2 \iff x \in L_1$$

nach Definition. Damit erfüllt  $t \circ f$  die erste Eigenschaft einer Polynomzeitreduktion.

Berechnet  $M_f$  die Funktion  $f$  in Zeit  $t_1 \in Pol_{\mu_1}^R$  und berechnet  $M_t$  die Funktion  $t$  in Zeit  $t_2 \in Pol_{\mu_2}^R$ , dann ist die Laufzeit der Turingmaschine, die bei Eingabe von  $x \in \Sigma^*$  zuerst wie  $M_t$  rechnet und auf dem Ergebnis dieser Berechnung wie  $M_f$  arbeitet, beschränkt durch

$$t_1(x) + t_2(f(x)).$$

Nach Voraussetzung gibt es Polynome  $p_i \in Pol$  mit

$$t_i \leq_{\mu_i}^R p_i$$

für  $i = 1, 2$ . Da  $f$  eine Polynomzeitreduktion ist, folgt

$$t_2 \circ f \in P(p_2)_{\mu_1}^R \subseteq Pol_{\mu_1}^R.$$

Infolge der schwachen Monotonie bezüglich Addition folgt

$$t_1 + t_2 \circ f \in Pol_{\mu_1}^R.$$

Damit hat  $t \circ f$  die zweite Eigenschaft einer Polynomzeitreduktion.

Sei  $h \leq_{\mu_3}^R g$ , dann ist

$$h \circ t \in P(g)_{\mu_2}^R,$$

da  $t$  Polynomzeitreduktion ist, d.h. es gibt ein  $g' \in P(g)$  mit

$$h \circ t \leq_{\mu_2}^R g'.$$

Weiter ist dann

$$h \circ t \circ f \in P(g')_{\mu_1}^R \subseteq P(P(g))_{\mu_1}^R$$

nach Voraussetzung. Nach Lemma 3.6 gilt  $P(P(g)) = P(g)$ . Somit folgt

$$h \circ (t \circ f) \in P(g)_{\mu_1}^R.$$

Es folgt daraus, daß  $t \circ f$  eine Polynomzeitreduktion ist. ■

## 5.2 P-Transformationen

Es ist in der Regel schwierig, die dritte Bedingung in der Definition des Begriffs “Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$ ” bei gegebener Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  zu verifizieren. Häufig benutzt man jedoch Polynomzeitreduktionen von einem speziellen, “unkomplizierten” Typ.

In diesem Abschnitt geben wir für einige der im ersten Kapitel vorgestellten schwachen average-case Modelle  $R$  ein hinreichendes Kriterium dafür an, daß eine Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  die dritte Bedingung in der Definition einer Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$  erfüllt.

Sei  $\mu$  eine Dichte und  $\mu_f$  die in Definition 3.34 definierte durch  $f$  über  $\mu$  induzierte Dichte.

Ein Vergleichsmodell  $R = (H, V)$  mit den Eigenschaften

1. für alle  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  folgt für alle  $h \in \mathcal{F}$  und  $g \in H$  aus  $h \leq_{\mu_f}^R g$  die Ungleichung  $h \circ f \leq_{\mu}^R g \circ f$ , und
2. für alle  $\mu, g \in \mathcal{F}$  und  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  mit  $|f(\cdot)| \in \text{Pol}_{\mu}^R$  folgt  $g \circ f \in P(g)_{\mu}^R$ ,

hat offensichtlich eine besonders angenehme Struktur. Man kann für ein solches Vergleichsmodell leicht eine hinreichende Bedingung dafür angeben, welche Funktionen  $f$  die dritte Bedingung in der Definition 5.1 erfüllen: Dazu muß die Dichte  $\mu_2$  die Dichte  $\mu_{1,f}$  funktionenweise bezüglich  $R$  dominieren und es muß  $|f(\cdot)| \in \text{Pol}_{\mu_1}^R$  gelten. Dann folgt aus den Eigenschaften von  $R$  für alle  $h \leq_{\mu_2}^R g$ , daß  $h \circ f \in P(g)_{\mu_1}^R$  gilt.

Leider haben die Beispiele für schwache average-case Modelle aus Kapitel 2 diese Eigenschaften in dieser Allgemeinheit nicht. Für spezielle Funktionen  $f$  liegen diese Eigenschaften jedoch vor. In der folgenden Definition führen wir einen Begriff für solche Funktionen ein.

**Definition 5.5** *Sei  $R$  ein schwaches average-case Modell. Eine Funktion  $f$  heißt P-Transformation (bezüglich  $R$ ), wenn für alle Dichten  $\mu$  und alle  $h \in \mathcal{F}$ ,  $g \in H$  gilt: Sind  $|f(\cdot)| \in \text{Pol}_{\mu}^R$  und  $h \leq_{\mu_f}^R g$ , so folgt*

$$h \circ f \in P(g)_{\mu}^R.$$

Es gilt das folgende Lemma für schwache average-case Modelle, die die polynomielle Dominanzeigenschaft haben:

**Lemma 5.6** *Sei  $R$  ein schwaches average-case Modell, das die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz hat, und seien  $\mu_1, \mu_2$  Dichten,  $f$  eine P-Transformation bezüglich  $R$  mit  $|f(\cdot)| \in \text{Pol}_{\mu_1}^R$ . Begrenzt dann  $\mu_2$  die Dichte  $\mu_{1,f}$  polynomiell, so gilt für alle  $h \leq_{\mu_2}^R g$*

$$h \circ f \in P(g)_{\mu_1}^R.$$

Welche Funktionen P-Transformationen sind, hängt direkt von dem zugrunde liegenden Vergleichsmodell ab. Wir untersuchen im folgenden für verschiedene average-case Modelle, welche Funktionen P-Transformationen sind.

**Satz 5.7** *Im PolySum2-Modell sind alle Funktionen  $f$ , für die es  $c, k > 0$  gibt, so daß*

$$|f(x)| \geq c \cdot |x|^{\frac{1}{k}}$$

für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt, P-Transformationen bezüglich  $\mathcal{S}$ .

**Beweis:** Sei  $|f(\cdot)| \in \text{Pol}_{\mu_1}^{\mathcal{S}}$ ,  $h \leq_{\mu_1, f}^{\mathcal{S}} g$  und gelte für alle  $x \in \Sigma^*$

$$|f(x)| \geq c \cdot |x|^{\frac{1}{k}}.$$

Dann gibt es ein  $s > 0$ , so daß für alle  $t \in \mathbb{N}$

$$\sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ |f(x)| > |x|^s}} \mu_1(x) \cdot |x|^t < \infty$$

gilt, d.h.

$$|f(\cdot)| \leq_{\mu_1}^{\mathcal{S}} |\cdot|^s. \quad (5.1)$$

Setze  $w(x) = \max_{|y| \leq |x|^s} g(y)$ , dann ist  $w \in P(g)$ .

Für alle  $t \in \mathbb{N}$  gilt

$$\begin{aligned} \infty &> \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ h(x) > g(x)}} \mu_{1, f}(x) \cdot |x|^t \\ &= \sum_{\substack{x \in \Sigma^* \\ h(x) > g(x)}} \left( \sum_{\substack{y \in \Sigma^* \\ f(y) = x}} \mu_1(y) \right) \cdot |x|^t \\ &= \sum_{\substack{y \in \Sigma^* \\ h(f(y)) > g(f(y))}} \mu_1(y) \cdot |f(y)|^t \\ &\geq \sum_{\substack{y \in \Sigma^* \\ h(f(y)) > g(f(y))}} \mu_1(y) \cdot c^t \cdot |y|^{t/k}. \end{aligned}$$

Daher ist

$$h \circ f \leq_{\mu_1}^{\mathcal{S}} g \circ f.$$

Gilt für ein  $x \in \Sigma^*$  die Ungleichung  $g(f(x)) > w(x)$ , so folgt  $f(x) > |x|^s$ . Somit ist wegen Ungleichung (5.1) und der Definition von  $\mathcal{S}$

$$g \circ f \leq_{\mu_1}^{\mathcal{S}} w.$$

Da  $\mathcal{S}$  stark transitiv und  $w \in P(g)$  ist, erhalten wir

$$h \circ f \in P(g)_{\mu_1}^{\mathcal{S}}.$$

Daher ist  $f$  eine P-Transformation bezüglich  $\mathcal{S}$ . ■

**Satz 5.8** *Im PolySum1-Modell sind alle Funktionen  $f$ , für die es  $c, k > 0$  mit*

$$|f(x)| \geq c \cdot |x|^{1/k}$$

*für alle  $x \in \Sigma^*$  gibt und die*

$$|x| = |y| \iff |f(x)| = |f(y)|$$

*erfüllen,  $P$ -Transformationen bezüglich  $\mathcal{MS}$ .*

**Beweis:** Sei  $\mu$  eine Dichte mit  $|f(\cdot)| \in \text{Pol}_{\mu}^{\mathcal{MS}}$  und  $h \leq_{\mu_f}^{\mathcal{MS}} g$ . Setze  $F(n) = |f(0^n)|$ , dann gilt für alle  $x \in \Sigma^*$

$$F(|x|) = |f(x)|.$$

Weiter gilt

$$s_{\mu}(n) > 0 \iff s_{\mu_f}(F(n)) > 0$$

und

$$\mu_{f, \mathbb{N}}(m) = \mu_{\mathbb{N}}(F^{-1}(m)).$$

Daher gilt für  $|y| = m$

$$\mu_{f, m}(y) = \frac{\mu_f(y)}{\mu_{f, \mathbb{N}}(|y|)} = \frac{\mu_f(y)}{\mu_{\mathbb{N}}(F^{-1}(|y|))}.$$

Es folgt für alle  $t \in \mathbb{N}$  und  $n \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} & \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ h(f(x)) > g(f(x))}} |x|^t \cdot \mu_n(x) \\ & \leq \frac{1}{c^{k \cdot t}} \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ h(f(x)) > g(f(x))}} |f(x)|^{k \cdot t} \cdot \mu_n(x) \\ & \leq \frac{1}{c^{k \cdot t}} \cdot \frac{1}{\mu_{\mathbb{N}}(n)} \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ h(f(x)) > g(f(x))}} |f(x)|^{k \cdot t} \cdot \mu(x) \\ & \leq \frac{1}{c^{k \cdot t}} \cdot \frac{1}{\mu_{\mathbb{N}}(n)} \cdot F(n)^{k \cdot t} \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ h(f(x)) > g(f(x))}} \mu(x) \\ & \leq \frac{1}{c^{k \cdot t}} \cdot \frac{1}{\mu_{\mathbb{N}}(n)} \cdot F(n)^{k \cdot t} \cdot \sum_{\substack{|y|=F(n) \\ h(y) > g(y)}} \mu_f(y) \\ & \leq \frac{1}{c^{k \cdot t}} \cdot \sum_{\substack{|y|=F(n) \\ h(y) > g(y)}} |y|^{k \cdot t} \cdot \frac{\mu_f(y)}{\mu_{\mathbb{N}}(F^{-1}(|y|))} \\ & \leq \frac{1}{c^{k \cdot t}} \cdot \sum_{\substack{|y|=F(n) \\ h(y) > g(y)}} |y|^{k \cdot t} \cdot \frac{\mu_f(y)}{\mu_{f, \mathbb{N}}(|y|)} \\ & \leq \frac{1}{c^{k \cdot t}} \cdot \sum_{\substack{|y|=F(n) \\ h(y) > g(y)}} |y|^{k \cdot t} \cdot \mu_{f, F(n)}(y). \end{aligned}$$

Da  $|f(x)| \geq c \cdot |x|^{1/k}$  für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt, folgt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F(n) = \infty.$$

Da aber  $h \leq_{\mu_f}^{\mathcal{MS}} g$  und daher für alle  $s > 0$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \left( s_{\mu_f}(m) \cdot \sum_{\substack{|y|=m \\ h(y) > g(y)}} |y|^s \cdot \mu_{f,m}(y) \right) = 0$$

gilt, folgt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_{\mu}(n) \cdot \sum_{\substack{x \in \Sigma^n \\ h(f(x)) > g(f(x))}} |x|^t \cdot \mu_n(x) \right) = 0.$$

Also ist  $h \circ f \leq_{\mu}^{\mathcal{MS}} g \circ f$ . Es bleibt die Behauptung, daß

$$g \circ f \in P(g)_{\mu}^{\mathcal{MS}}$$

gilt, zu zeigen. Wegen  $|f(\cdot)| \in Pol_{\mu}^{\mathcal{MS}}$  gibt es ein  $s \geq 1$  mit

$$|f(\cdot)| \leq_{\mu}^{\mathcal{MS}} |\cdot|^s.$$

Sei  $t : \Sigma^* \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  die folgende Funktion mit

$$t(x) = \max_{|y| \leq |x|^s} g(y)$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ . Dann ist  $t \in P(g)$  und für alle  $x \in \Sigma^*$  mit  $g(f(x)) > t(x)$  gilt  $|f(x)| > |x|^s$ . Daher folgt für alle  $t \in \mathbb{N}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_{\mu}(n) \cdot n^t \cdot \sum_{\substack{|x|=n \\ g(f(x)) > t(x)}} \mu_n(x) \right) \quad (5.2)$$

$$\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left( s_{\mu}(n) \cdot n^t \cdot \sum_{\substack{|x|=n \\ |f(x)| > |x|^s}} \mu_n(x) \right) \quad (5.3)$$

$$= 0. \quad (5.4)$$

Dabei gilt die letzte Ungleichung, da  $|f(\cdot)| \leq_{\mu}^{\mathcal{MS}} |\cdot|^s$  ist. Somit ist  $g \circ f \leq_{\mu}^{\mathcal{MS}} t$  und es folgt  $g \circ f \in P(g)_{\mu}^{\mathcal{MS}}$ .

Daraus folgt die Behauptung des Satzes. ■

**Satz 5.9** *Im erweiterten Levinschen Modell sind alle Funktionen  $f \in \mathcal{F}$  P-Transformationen bezüglich  $\mathcal{L}$ .*

**Beweis:** Sei  $|f(\cdot)| \in Pol_\mu^{\mathcal{L}}$ , und gelte  $h \leq_{\mu_f}^{\mathcal{L}} g$ . Dann gibt es eine Konstante  $t \geq 1$ , so daß

$$d = \sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \frac{f(x)^{\frac{1}{t}}}{|x|} < \infty \quad (5.5)$$

gilt, und ferner ist

$$\sum_{y \in \Sigma^*} \mu_f(y) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(h(y))}{|y|} < \infty.$$

Sei

$$\begin{aligned} C &= \sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))^{\frac{1}{2t}}}{|x|} \\ &= \sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))^{\frac{1}{2t}}}{|f(x)|^{\frac{1}{2t}}} \cdot \frac{|f(x)|^{\frac{1}{2t}}}{|x|}. \end{aligned}$$

Da  $\sqrt{a \cdot b} \leq \frac{a+b}{2}$  für alle  $a, b > 0$  gilt, folgt für alle  $x \in \Sigma^*$

$$\begin{aligned} \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))^{\frac{1}{2t}}}{|f(x)|^{\frac{1}{2t}}} \cdot \frac{|f(x)|^{\frac{1}{2t}}}{|x|} &\leq \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))^{\frac{1}{t}}}{|f(x)|^{\frac{1}{t}}} + \frac{|f(x)|^{\frac{1}{t}}}{|x|^2} \right) \\ &\leq \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))^{\frac{1}{t}}}{|f(x)|^{\frac{1}{t}}} + \frac{|f(x)|^{\frac{1}{t}}}{|x|} \right). \end{aligned}$$

Damit ergibt sich

$$\begin{aligned} C &\leq \frac{1}{2} \cdot \sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \left( \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))}{|f(x)|} \right)^{\frac{1}{t}} + \frac{|f(x)|^{\frac{1}{t}}}{|x|} \right) \\ &\leq \frac{1}{2} \cdot \sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))}{|f(x)|} \right)^{\frac{1}{t}} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \frac{|f(x)|^{\frac{1}{t}}}{|x|} \\ &\leq 2 \cdot d + \sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))}{|f(x)|} \right)^{\frac{1}{t}}. \end{aligned}$$

Die letzte Ungleichung folgt aus Ungleichung (5.5). Wir schätzen nun die verbleibende unendliche Reihe ab. Dazu sei

$$T = \left\{ x \in \Sigma^* : \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))}{|f(x)|} \right)^{\frac{1}{t}} \leq 1 \right\}.$$

Dann ist

$$\sum_{x \in \Sigma^*} \mu(x) \cdot \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))}{|f(x)|} \right)^{\frac{1}{t}}$$

$$\begin{aligned}
 &\leq 1 + \sum_{x \in \Sigma^* \setminus T} \mu(x) \cdot \left( \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))}{|f(x)|} \right)^{\frac{1}{t}} \\
 &\leq 1 + \sum_{x \in \Sigma^* \setminus T} \mu(x) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(h(f(x)))}{|f(x)|} \\
 &\leq 1 + \sum_{y \in \Sigma^*} \mu_f(y) \cdot \frac{\widehat{g}^{-1}(h(y))}{|y|} \\
 &< \infty
 \end{aligned}$$

nach Voraussetzung. Daraus ergibt sich, daß  $C < \infty$  ist. Sei für alle  $x \in \Sigma^*$

$$s(x) = \max_{|y| \leq |x|^{2-t}} g(y),$$

dann ist  $s \in P(g)$  und  $s(\cdot) = \widehat{g}(|\cdot|^{2-t})$ . Weiter gilt

$$\widehat{s}^{-1}(\cdot) \leq_{R_0^+} (\widehat{g}^{-1}(\cdot))^{\frac{1}{2-t}}.$$

Man beachte dabei, daß  $s$  längenwachsend ist, da  $g$  längenwachsend ist. Also ist  $s$  eine Vergleichsfunktion im erweiterten Levinschen Modell. Somit folgt

$$\sum_{x \in \Sigma^+} \mu(x) \cdot \frac{\widehat{s}^{-1}(h(f(x)))}{|x|} \leq C < \infty$$

und damit

$$h \circ f \leq_{\mu}^{\mathcal{L}} s.$$

Daraus ergibt sich

$$h \circ f \in P(g)_{\mu}^{\mathcal{L}}.$$

Also ist  $f$  eine P-Transformation bezüglich  $\mathcal{L}$ . ■

Wie man leicht sieht, läßt sich im  $\mathcal{FU}$ -Modell der analoge Satz zeigen.

**Satz 5.10** *Im  $\mathcal{FU}$ -Modell sind alle Funktionen  $f$  P-Transformationen bezüglich  $\mathcal{FU}$ .*

### 5.3 Glatte schwache average-case Modelle

Wir haben im vorangehenden Abschnitt für verschiedene Modelle hinreichende Bedingungen kennengelernt, unter denen eine Funktion  $f$  eine P-Transformation ist: Im erweiterten Levinschen Modell, im PolySum1-, im PolySum2- und im  $\mathcal{FU}$ -Modell gilt, daß jede Funktion  $f$ , die die folgenden Eigenschaften hat, eine P-Transformation ist:

1. Es gibt  $c, k > 0$  mit  $|f(x)| \geq c \cdot |x|^{1/k}$  für alle  $x \in \Sigma^*$ .
2.  $|x| = |y| \iff |f(x)| = |f(y)|$ .

**Definition 5.11** Ein schwaches average-case Modell  $R$ , das die polynomielle Dominanzeigenschaft hat und für das gilt, daß alle Funktionen mit den obigen Eigenschaften 1 und 2  $P$ -Transformationen bezüglich  $R$  sind, heißt glatt.

Gemäß den im vorangehenden Abschnitt und in Abschnitt 3.1.3 gezeigten Aussagen gelten die beiden folgenden Lemmata:

**Lemma 5.12** Jedes Vergleichsmodell  $R \in \{\mathcal{S}, \mathcal{L}, \mathcal{FU}\}$  ist glatt.

Das PolySum1-Modell  $\mathcal{MS}$  ist nicht glatt, da es gemäß Lemma 3.11 nicht die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz hat.

**Lemma 5.13** Seien  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  und  $\mu_1, \mu_2 \in \mathcal{D}$ . Ist  $R$  ein glattes schwaches average-case Modell und ist  $f$  eine Abbildung mit

1.  $f(x) \in L_2 \iff x \in L_1$ ,
2.  $f$  ist in mittlerer  $P$ -Zeit bezüglich  $\mu_1$  und  $R$  berechenbar,
3. es gibt  $c, k > 0$  mit  $|f(x)| \geq c \cdot |x|^{1/k}$  für alle  $x \in \Sigma^*$ ,
4.  $|x| = |y| \iff |f(x)| = |f(y)|$ ,
5.  $\mu_2$  begrenzt polynomiell  $\mu_{1,f}$ ,

so reduziert  $f$  das Paar  $(L_1, \mu_1)$  polynomiell bezüglich  $R$  auf  $(L_2, \mu_2)$ .

**Beweis:** Hat  $f$  die Eigenschaften 1 bis 5, so hat  $f$  offensichtlich die ersten beiden Eigenschaften einer Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$ , und wir müssen nur die dritte Eigenschaft nachweisen.

Sei  $h \leq_{\mu_2}^R g$ , dann gilt gemäß der Eigenschaft der polynomiellen Dominanz und der fünften Eigenschaft von  $f$

$$h \in P(g)_{\mu_{1,f}}^R. \quad (5.6)$$

Da  $R$  glatt ist und  $f$  die Eigenschaften 3 und 4 hat, ist  $f$  eine  $P$ -Transformation bezüglich  $R$ . Somit gilt

$$h \circ f \in P(g)_{\mu_1}^R$$

nach Lemma 5.6. Damit ist die Aussage des Lemmas bewiesen. ■

Wir kommen nun zur Definition des Vollständigkeitsbegriffs.

**Definition 5.14**

Sei  $R$  ein schwaches average-case Modell,  $L' \subseteq \Sigma^*$  und  $\mu \in \mathcal{D}$ . Sei

$$\mathcal{T} \subseteq \{(L, \mu) : L \subseteq \Sigma^*, \mu \in \mathcal{D}\}.$$

Wir sagen  $(L', \mu)$  ist  $\mathcal{T}$ -hart bezüglich  $R$ , wenn es für alle Paare  $(L, \gamma) \in \mathcal{T}$  eine Polynomzeitreduktion  $f$  bezüglich  $R$  von  $(L, \gamma)$  nach  $(L', \mu)$  gibt.

Gilt ferner  $(L', \mu) \in \mathcal{T}$ , so ist  $(L', \mu)$  vollständig bezüglich  $R$  in  $\mathcal{T}$ .

Der folgende Satz begründet die Bedeutung  $\mathcal{T}$ -harter Paare  $(L', \mu)$ :

**Satz 5.15**

Sei  $R$  ein schwaches average-case Modell und sei  $\mathcal{T} \subseteq \{(L, \mu) : L \subseteq \Sigma^*, \mu \in \mathcal{D}\}$ . Falls es ein  $\mathcal{T}$ -hartes Paar  $(L', \mu)$ ,  $L' \subseteq \Sigma^*$ ,  $\mu \in \mathcal{D}$ , mit  $L' \in DTime_{\mu}^R(Pol)$  gibt, gilt für alle  $(L, \gamma) \in \mathcal{T}$ :

$$L \in DTime_{\gamma}^R(Pol).$$

**Beweis:** Für alle  $(L, \gamma) \in \mathcal{T}$  gibt es eine Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$  von  $(L, \gamma)$  nach  $(L', \mu)$  und es gilt  $L' \in DTime_{\mu}^R(Pol)$ . Nach Satz 5.2 folgt dann

$$L \in DTime_{\gamma}^R(Pol). \quad \blacksquare$$

Im folgenden Abschnitt untersuchen wir einige Mengen  $\mathcal{T}$ , die von einem speziellen Typ sind. Diese haben nämlich die Form  $\mathcal{T} = S \times D$ , wobei  $S$  eine Menge von Sprachen und  $D \subseteq \mathcal{D}$  ist. Für diese Mengen ergibt sich aus obigem Satz das folgende Korollar:

**Korollar 5.16** Sei  $R$  ein schwaches average-case Modell,  $S$  eine Menge von Sprachen,  $D \subseteq \mathcal{D}$  und  $\mathcal{T} = S \times D$ . Falls es ein  $\mathcal{T}$ -hartes Paar  $(L', \mu)$ ,  $L' \subseteq \Sigma^*$ ,  $\mu \in \mathcal{D}$ , mit  $L' \in DTime_{\mu}^R(Pol)$  gibt, gilt  $S \subseteq DTime_D^R(Pol)$ .

## 5.4 Vollständigkeitsresultate

Wir weisen in den folgenden Sätzen nach, daß es solche vollständigen Probleme bezüglich glatter schwacher average-case Modelle gibt.

Sei  $DistNP = \{(L, \mu) : L \in \mathcal{NP}, \mu \in Vapprox(Pol, \mathcal{F})\}$ .

**Satz 5.17** Sei  $R$  ein glattes schwaches average-case Modell. Dann gibt es ein Paar  $(L, \mu)$ , das vollständig bezüglich  $R$  in  $DistNP$  ist.

Der Beweis dieses Satzes benutzt Beweistechniken aus [6]. Der Unterschied zum entsprechenden Beweis in [6] besteht darin, daß wir hier nur Reduktionsabbildungen  $f$  mit

$$|x| = |y| \iff |f(x)| = |f(y)|$$

benutzen. Wir benötigen dabei ein Lemma aus [6], auf dessen Beweis wir hier verzichten.

**Lemma 5.18** Ist  $\mu \in Vcomp(Pol, \mathcal{F})$ , so gibt es eine injektive Funktion

$$code_{\mu} : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*,$$

die in polynomieller Zeit von einer deterministischen Turingmaschine  $M_{code}$  berechnet wird, mit

$$|code_{\mu}(x)| \leq 2 + \min \left\{ |x|, \log_2 \left( \frac{1}{\mu(x)} \right) \right\}$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ .

**Beweis von Satz 5.17:** Um die Behauptung zu beweisen, müssen wir ein spezielles vollständiges Paar  $(L_0, \mu_0) \in DistNP$  und für jedes Paar  $(L, \gamma) \in DistNP$  eine Polynomzeitreduktion  $f$  von  $(L, \gamma)$  auf  $(L_0, \mu_0)$  angeben. Wir gehen dabei wie folgt vor: zuerst zeigen wir, daß es zu  $(L, \gamma)$  eine Dichte  $\mu \in Vcomp(Pol, \mathcal{F})$  und eine Polynomzeitreduktion von  $(L, \gamma)$  auf  $(L, \mu)$  gibt. Dann reduzieren wir  $(L, \mu)$  auf ein Paar  $(BH_L, \mu_1)$ , wobei  $BH_L$  eine von  $L$  abhängige Sprache ist, aber  $\mu_1$  weder von  $L$  noch von  $\mu$  abhängt. Schließlich reduzieren wir  $(BH_L, \mu_1)$  auf das Paar  $(BH, \mu_0)$ , wobei  $BH$  eine Variante der bekannten Sprache *Bounded Halting* ist. (Vergleiche zum Beispiel Definition 3.7 in [17].)

1. *Reduktion von  $(L, \gamma)$  auf ein Paar  $(L, \mu)$  mit  $\mu \in Vcomp(Pol, \mathcal{F})$ :*

Nach Lemma 3.25 gibt es eine Dichte  $\mu \in Vcomp(Pol, \mathcal{F})$  mit

$$10 \cdot \mu(x) \geq \gamma(x)$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ . Da  $R$  glatt ist, ist  $t(x) = x$  gemäß Lemma 5.13 offenbar eine Polynomzeitreduktion von  $(L, \gamma)$  auf  $(L, \mu)$ .

2. *Reduktion von  $(L, \mu)$  auf  $(BH_L, \mu_1)$ :*

Nach Lemma 5.18 existiert zu  $\mu$  eine Funktion  $code_\mu : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ , die in polynomieller Zeit von einer deterministischen Turingmaschine  $M_{code}$  berechnet wird und für die

$$|code_\mu(x)| \leq 2 + \min \left\{ |x|, \log_2 \left( \frac{1}{\mu(x)} \right) \right\} \quad (5.7)$$

für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt. Sei  $M_D$  die folgende nichtdeterministische Turingmaschine: bei Eingabe  $x'$  rät  $M_D$  ein  $x$  und berechnet  $M_{code}(x)$ . Ist  $x'$  gleich der Ausgabe dieser Maschine, so gibt sie  $x$  aus, sonst geht sie in eine Endlosschleife. Somit bestimmt  $M_D$  zu  $x'$  das Urbild bezüglich der Abbildung  $code_\mu$ , falls ein solches existiert. Sei  $t \in \mathbb{N}$  so gewählt, daß  $|x'|^t$  eine obere Schranke für die Laufzeit dieser Berechnung ist. Seien eine nichtdeterministische Turingmaschine  $M_L$ , die  $L$  akzeptiert, und ein  $l > 0$  so gewählt, daß bei keiner Eingabe  $x \in \Sigma^*$  die Turingmaschine  $M_L$  mehr als  $|x|^l$  Schritte macht. Sei  $M_B$  die Turingmaschine, die durch Hintereinanderschalten von zuerst  $M_D$  und dann  $M_L$  entsteht. Wir bezeichnen mit

$$BH_L$$

die Menge aller Strings

$$x'01^k,$$

für die gilt, daß  $M_B$  die Eingabe  $x'$  in maximal  $k + |x'|$  Schritten akzeptiert.

Sei

$$\mu_1(x) = \begin{cases} \frac{c}{k^2 \cdot |x'|^2 \cdot 2^{|x'|}} & \text{falls } x = x'01^k \text{ für ein } k \geq 1, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

wobei  $c$  die Normierungskonstante ist. Es gilt offensichtlich:  $BH_L \in \mathcal{NP}$  und  $\mu_1 \in Vapprox(Pol, \mathcal{F})$ .

Wir konstruieren nun eine Polynomzeitreduktion von  $(L, \mu)$  auf das Paar  $(BH_L, \mu_1)$ . Dabei stellen wir sicher, daß die Reduktionsabbildung die Eigenschaften aus Lemma 5.13 hat.

Sei  $w \in \mathbb{N}$ , so daß für alle  $x \neq \varepsilon$  gilt:

$$w + |x|^w \geq |code_\mu(x)|^t + |x|^l.$$

Ein solches  $w$  existiert, da  $|code_\mu(x)|$  in P-Zeit berechenbar und damit polynomiell beschränkt ist. Die Polynomzeitreduktion von  $(L, \mu)$  auf  $(BH_L, \mu_1)$  hat dann die Form

$$f(x) = code_\mu(x)01^c,$$

wobei

$$c = w + |x|^w - |code_\mu(x)|$$

ist.

Wir zeigen, daß  $f$  die Eigenschaften einer Polynomzeitreduktion hat:

Es gilt  $x \in L$  genau dann, wenn  $M_B$  die Eingabe  $code_\mu(x)$  in maximal

$$|code_\mu(x)|^t + |x|^l \leq w + |x|^w$$

Schritten akzeptiert. Dies gilt genau dann, wenn

$$code_\mu(x)01^c \in BH_L$$

gilt, wobei

$$c = w + |x|^w - |code_\mu(x)| \tag{5.8}$$

ist.

Darüber hinaus kann  $f$  in polynomieller Zeit berechnet werden, da  $code_\mu$  in polynomieller Zeit berechenbar ist.

Schließlich gilt

$$|f(x)| = w + |x|^w \geq |x|.$$

Da  $f$  injektiv ist, gilt

$$\mu_f(y) = \begin{cases} 0 & \text{falls } y \notin f(\Sigma^*), \\ \mu(x) & \text{falls } y = f(x). \end{cases}$$

Daher folgt für alle  $y \notin f(\Sigma^*)$

$$\mu_1(y) \geq 0 = \mu_f(y).$$

Und für alle  $y \in f(\Sigma^*)$  folgt, daß  $y$  die folgende Form hat:

$$y = x'01^k.$$

Dabei gilt für  $x$  mit  $\text{code}_\mu(x) = x'$ :

$$k = w + |x|^w - |\text{code}_\mu(x)| = w + |x|^w - |x'|.$$

Aus Ungleichung (5.7) folgt

$$|x'| = |\text{code}_\mu(x)| \leq 2 + \max \left\{ |x|, \log_2 \left( \frac{1}{\mu(x)} \right) \right\}.$$

Daher ist für fast alle  $y \in \Sigma^*$  mit  $y = x'01^k$

$$\begin{aligned} \mu_1(y) &= \frac{c}{|x'|^2 \cdot 2^{|x'|} \cdot k^2} \\ &\geq \frac{c}{d \cdot |x|^2 \cdot 2^{2+\log_2\left(\frac{1}{\mu(x)}\right)} \cdot |x|^{2 \cdot w}} \\ &\geq \frac{c}{4 \cdot d \cdot |x|^{2+2 \cdot w}} \cdot \mu(x) \\ &\geq \frac{c}{4 \cdot d \cdot |y|^{2+2 \cdot w}} \cdot \mu_f(y), \end{aligned}$$

für ein  $d > 0$ . Dabei gilt die letzte Ungleichung, da  $|y| = |f(x)| \geq |x|$  gilt. Also wird  $\mu_f$  polynomiell begrenzt von  $\mu_1$ .

Nach Lemma 5.13 ist  $f$  eine Polynomzeitreduktion, da  $R$  glatt ist.

### 3. Reduktion von $(BH_L, \mu_1)$ auf $(BH, \mu_0)$ :

Sei mit  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  eine in Polynomzeit berechenbare und invertierbare Pairing-Funktion (vergleiche Seite 7 in [17]) bezeichnet, die die folgende Eigenschaft hat: Es gibt eine Konstante  $d \geq 0$ , so daß für alle  $x, y \in \Sigma^*$

$$|\langle x, y \rangle| = 2 \cdot |x| + |y| + d$$

gilt. Die Funktion  $p : \Sigma^* \times \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  mit  $p(x, y) = 1^{|x|}0xy$  ist ein Beispiel für eine solche Funktion. Sei

$BH$

die Menge aller  $y = \langle M, x01^k \rangle$ , wobei  $M$  die Kodierung einer nichtdeterministischen Turingmaschine ist, die die Eingabe  $x$  in maximal  $k + |x|$  Schritten akzeptiert.

Sei weiter

$$\mu_0(\langle M, x01^k \rangle) = \frac{c}{|M|^2 \cdot 2^{|M|}} \cdot \mu_1(x01^k). \quad (5.9)$$

Sei  $\tilde{M}_L$  die Kodierung einer nichtdeterministischen Turingmaschine, die  $BH_L$  in polynomieller Zeit akzeptiert. Wir zeigen, daß die Funktion

$$g(y) = \langle \tilde{M}_L, y \rangle$$

eine Polynomzeitreduktion von  $(BH_L, \mu_1)$  auf  $(BH, \mu_0)$  ist.

Hat  $y$  nicht die Form  $x01^k$ , so ist  $y \notin BH_L$  und ebenso ist  $\langle \tilde{M}_L, y \rangle \notin BH$ . Für  $y = x01^k$  gilt: Die Maschine  $\tilde{M}_L$  akzeptiert die Eingabe  $x$  in maximal  $k + |x|$  Schritten genau dann, wenn  $x01^k \in BH_L$  gilt. Dies ist genau dann der Fall, wenn  $\langle \tilde{M}_L, x01^k \rangle \in BH$  gilt.

Offensichtlich kann  $g$  in polynomieller Zeit berechnet werden.

Darüber hinaus ist  $g$  injektiv, und es gilt

$$|g(x01^k)| = |x01^k| + c' \geq |x|,$$

wobei  $c'$  eine Konstante ist.

Aus der Injektivität von  $g$  folgt

$$\mu_{1,g}(y) = \begin{cases} 0 & \text{falls } y \notin g(\Sigma^*), \\ \mu_1(x01^k) & \text{falls } y = \langle \tilde{M}_L, x01^k \rangle. \end{cases}$$

Daher gilt für  $y = \langle \tilde{M}_L, x01^k \rangle$

$$\begin{aligned} \mu_0(y) &= \frac{c}{|\tilde{M}_L|^2 \cdot 2^{|\tilde{M}_L|}} \cdot \mu_1(x01^k) \\ &= \frac{c}{|\tilde{M}_L|^2 \cdot 2^{|\tilde{M}_L|}} \cdot \mu_{1,g}(y). \end{aligned}$$

Also begrenzt  $\mu_0$  die Dichte  $\mu_{1,g}$  polynomiell, und daher ist  $g$  eine Polynomzeitreduktion.

Mit Lemma 5.4 folgt dann, daß  $g \circ f \circ t$  eine Polynomzeitreduktion von  $(L, \gamma)$  nach  $(BH, \mu_0)$  ist. Somit ist  $(BH, \mu_0)$  vollständig bezüglich  $R$  in  $DistNP$ .  $\blacksquare$

Ebenso zeigt man:

**Satz 5.19** Seien  $\mathcal{T} = \{(L, \mu) : L \in PSpace, \mu \in Vapprox(Pol, \mathcal{F})\}$  und  $R$  ein glattes schwaches average-case Modell. Dann gibt es ein Paar  $(L, \mu)$ , das vollständig bezüglich  $R$  in  $\mathcal{T}$  ist.

**Beweis:** Der Beweis verläuft analog zum Beweis des vorangehenden Satzes. Dabei verwendet man in der Definition der Dichte  $\mu_0$  (vergleiche Gleichung (5.9)) statt der nichtdeterministischen Turingmaschinen deterministische Turingmaschinen, statt der Sprache  $BH$  die Sprache

$$BP = \{ \langle M, x01^k \rangle : \begin{array}{l} M \text{ ist eine DTM, die } x \text{ akzeptiert und dabei} \\ \text{maximal } |x| + k \text{ Bandeinheiten benutzt} \end{array} \} \quad (5.10)$$

und, bei gegebenem  $L$ , im ersten Teil des Beweises statt  $BH_L$  die Sprache

$$BP_L = \{ x01^k : \begin{array}{l} M'_B \text{ akzeptiert } x \text{ in maximalem Platz von} \\ k + |x| \text{ Bandeinheiten} \end{array} \},$$

wobei  $M'_B$  die analoge Maschine zu  $M_B$  aus obigem Beweis ist. Die Maschine  $M'_B$  setzt sich aus einer deterministischen Turingmaschine  $M'_D$  zum Dekodieren der Eingabe und der entsprechenden Maschine zum Erkennen, ob der dekodierte String in

$L$  liegt oder nicht, zusammen. Da Dekodieren durch eine  $\mathcal{NP}$ -Maschine realisiert werden kann, kann es auch durch eine  $PSPACE$ -Maschine ausgeführt werden. Da  $L \in PSPACE$  gilt, gilt auch  $BPL \in PSPACE$ . ■

Verwendet man statt  $BH$  im Beweis von Satz 5.17 die Sprache

$$EBH = \{ \langle M, x01^k \rangle : \begin{array}{l} M \text{ ist eine DTM, die } x \text{ akzeptiert und dabei} \\ \text{maximal } 2^{|x|+k} \text{ Schritte macht} \end{array} \} \quad (5.11)$$

und statt  $BH_L$  die Sprache

$$EBH_L = \{ x01^k : M'_B \text{ akzeptiert } x \text{ in maximal } 2^{k+|x|} \text{ Schritten} \},$$

und paßt man die Definition der Dichte  $\mu_0$  geeignet an, so erhält man den nachstehenden Satz 5.20. Dabei ist  $M'_B$  die folgende deterministische Turingmaschine: Nach Voraussetzung gibt es eine deterministische Turingmaschine  $M_L$ , die die Sprache  $L$  in Zeit  $2^{O(|x|)}$  akzeptiert. Die Maschine  $M'_B$  dekodiert zuerst  $y = code_\mu(x)01^c$ , d.h. sie berechnet  $x$ . Anschließend wird  $M_L$  mit der Eingabe  $x$  gestartet. Da  $|y| \geq |x|$  gilt und die Laufzeit von  $M_L$  bei Eingabe  $x$  durch  $2^{O(|x|)} \leq 2^{O(|y|)}$  abgeschätzt werden kann, müssen wir nur noch die Zeit zum Dekodieren abschätzen, um zu zeigen, daß  $M'_B$  Laufzeit  $2^{O(|y|)}$  hat. Dies sieht man aber folgendermaßen: Der Wert  $\ell = |x|$  kann nach Wahl der Pairing-Funktion aus  $y$  gemäß Gleichung (5.8) in P-Zeit berechnet werden. Ebenso kann in P-Zeit getestet werden, ob für ein gegebenes  $x' \in \Sigma^*$

$$code_\mu(x')01^k = y$$

gilt, da die Funktion  $code_\mu$  in P-Zeit berechnet werden kann. Es muß daher nur das korrekte  $x$  zu dem gegebenen  $y$  gefunden und getestet werden. Dazu werden alle  $x' \in \Sigma^\ell$  durchprobiert. Somit sind zum Dekodieren nur  $2^{O(|y|)}$  Schritte nötig. Daraus folgt, daß  $EBH_L \in DExpTime$  gilt.

**Satz 5.20** Seien  $\mathcal{T} = \{(L, \mu) : L \in DExpTime, \mu \in Vapprox(Pol, \mathcal{F})\}$  und  $R$  ein glattes schwaches average-case Modell. Dann gibt es ein Paar  $(L, \mu)$ , das vollständig bezüglich  $R$  in  $\mathcal{T}$  ist.

Die obigen Resultate gelten bezüglich in P-Zeit approximierbarer Dichten. Wir kommen nun zu Ergebnissen für Klassen von Paaren  $(L, \mu)$ , wobei  $\mu$  eine in P-Zeit generierbare Dichte ist und  $L$  zum Beispiel in  $\mathcal{NP}$  liegt. In den folgenden Sätzen und Beweisen haben wir Techniken aus [1] auf unsere allgemeinere Situation übertragen.

**Satz 5.21** Seien  $\mathcal{T} = \{(L, \mu) : L \in \mathcal{NP}, \mu \in Vgen(Pol, \mathcal{F})\}$  und  $R$  ein glattes schwaches average-case Modell. Dann gibt es ein Paar  $(L, \mu)$ , das vollständig bezüglich  $R$  in  $\mathcal{T}$  ist.

**Beweis:** Wir geben zunächst einen Überblick über den Beweis an: Ziel ist es wieder, alle Paare  $(L, \gamma)$  mit  $L \in \mathcal{NP}$  und  $\gamma \in Vgen(Pol, \mathcal{F})$  auf ein Paar  $(BH, \tau)$  zu reduzieren, wobei  $\tau$  die durch die Reduktionen  $f$  induzierten Dichten  $\gamma_f$  dominiert und

$BH$  die aus dem Beweis zu Satz 5.17 bekannte Sprache *Bounded Halting* ist. Da alle Dichten  $\gamma$  in P-Zeit generierbar sind, sind auch die durch Reduktionen  $f$  induzierten Dichten in P-Zeit generierbar, falls  $f$  selbst in P-Zeit berechenbar ist. Somit liegt es nahe, eine Dichte  $\tau$  zu suchen, die alle in P-Zeit generierbaren Dichten polynomiell beschränkt. (Man sieht leicht, daß  $\tau$  in diesem Fall  $Vgen(Pol, \mathcal{F})$ -universell bezüglich  $R$  und  $P(C)$  für alle  $C \subseteq \mathcal{F}$  ist, da  $R$  die polynomielle Dominanzeigenschaft hat.) Ist  $\{\gamma_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine Aufzählung aller in P-Zeit generierbaren Dichten, so ist

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{6}{\pi^2} \cdot \frac{\gamma_i(x)}{i^2}$$

eine solche universelle Dichte bezüglich jedes schwachen average-case Modells, das die Eigenschaft der polynomiellen Dominanz hat. Leider ist aber unklar, ob diese Dichte in P-Zeit generiert werden kann, da die offensichtliche Methode, diese Dichte zu generieren, nicht in P-Zeit in der Länge der Ausgabe funktioniert. Diese offensichtliche Methode hat nämlich folgende Form: zuerst wird ein  $i \in \mathbb{N}_0$  zufällig gewählt, dann wird die Münzwurf-Maschine  $M_i$  berechnet, die  $\gamma_i$  generiert, und schließlich wird diese Maschine auf der Eingabe  $\varepsilon$  gestartet. Mit wachsendem  $i$  kann jedoch der Grad des Laufzeitpolynoms von  $M_i$  auch wachsen, so daß diese Konstruktion nicht zu einer Münzwurf-Maschine führt, deren Laufzeit polynomiell in der Länge der Ausgabe ist.

Dieses Problem umgeht man, wie in [2] dargestellt wird, indem man sich auf Dichten  $\gamma_i$  beschränkt, die in Zeit  $O(|\cdot|^2)$  in der Länge der Ausgabe generiert werden können. Dann zeigt man, daß es zu jedem Paar  $(L, \gamma)$  mit  $L \in \mathcal{NP}$  und  $\gamma \in Vgen(Pol, \mathcal{F})$ , ein Paar  $(L', \gamma')$  gibt, auf das  $(L, \gamma)$  mittels einer Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$  reduziert werden kann, wobei  $L' \in \mathcal{NP}$  und  $\gamma'$  eine in Zeit  $O(|\cdot|^2)$  generierbare Dichte ist.

Man muß also nur noch Dichten  $\gamma_i$  beachten, die in Zeit  $O(|\cdot|^2)$  generiert werden, dennoch bleibt bei obiger Methode folgendes Problem bestehen: Berechnet man zu  $i$  die Münzwurf-Maschine  $M_i$ , die die Dichte  $\gamma_i$  generiert, so ist die Zeit  $t(i)$  dafür wiederum abhängig von  $i$  und wächst sicherlich mit  $i$ . Wird also ein  $x$  mit Hilfe der Maschine  $M_i$  mit  $|x|^2 < t(i)$  generiert, so funktioniert die obige Methode sicher nicht in Zeit  $O(|\cdot|^2)$ . Ebenso sieht man, daß dies nicht in polynomiell beschränkter Zeit in der Länge der Ausgabe realisierbar ist. Wir umgehen dieses Problem im folgenden, indem wir die Dichte  $\tau$  passend verändern.

Wir kommen nunmehr zum detaillierten Beweis des Satzes.

Sei  $\{M_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine rekursive Aufzählung aller Münzwurf-Maschinen mit nur einem Arbeitsband, und sei  $E$  eine deterministische Turingmaschine, die bei Eingabe  $1^i$ ,  $i \in \mathbb{N}_0$ , die Kodierung der Münzwurf-Maschine  $M_i$  ausgibt. Benötige  $E$  dafür  $t(i)$  Schritte.

Sei  $\gamma_i$  die von  $M_i$  bei Eingabe  $\varepsilon$  generierte Dichte, d.h. für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt

$$\gamma_i(x) = \pi_{M_i}(\varepsilon, x).$$

Man betrachte folgende Münzwurf-Maschine  $Q$ : Eingabe der Maschine  $Q$  ist die Kodierung einer Münzwurf-Maschine  $M_i$  mit nur einem Arbeitsband. Die Maschine

$Q$  hat zusätzlich zum Eingabeband vier Arbeitsbänder. Auf dem ersten Band wird die Berechnung der Maschine  $M_i$  an der Eingabe  $\varepsilon$  simuliert, auf dem zweiten Arbeitsband wird parallel dazu die Zahl der simulierten Schritte notiert, und auf dem dritten Arbeitsband wird die Zahl der Schritte, die  $Q$  macht, unär notiert. Ist die Simulation von  $M_i$  beendet und hat  $M_i$  dabei die Ausgabe  $x$  in  $t$  Schritten berechnet, so berechnet  $Q$  auf dem vierten Arbeitsband den Wert  $2 \cdot |x|^2 + 2$  und prüft durch Vergleich der Länge des beschriebenen Teils des zweiten und vierten Arbeitsbandes, ob

$$t \leq 2 \cdot |x|^2 + 2$$

gilt. In diesem Fall gibt  $Q$  den Wert  $x$  aus, andernfalls wird die Protokollierung der Laufzeit auf Band vier gestoppt und der Inhalt des dritten Bandes ausgegeben.

Die dabei generierte Dichte bezeichnen wir mit  $\gamma'_i$ .

*Behauptung 1:*

*Die Laufzeit der Maschine  $Q$  ist durch  $O(|x|^3)$  bei Ausgabe  $x$  beschränkt.*

Ist  $M_i$  die Eingabe von  $Q$ , und werden  $t$  Schritte der Maschine  $M_i$  simuliert, bis diese mit Ausgabe  $x$  hält, so sind zur Simulation dieser  $t$  Schritte von  $M_i$ ,  $i \in \mathbb{N}_0$ , maximal  $O(t \cdot \log_2 t)$  Schritte in der Simulation nötig. Da alle anderen Aktionen auf den übrigen Bändern parallel durchgeführt werden, kosten diese keine weitere Zeit. Zur Berechnung des Wertes  $2 \cdot |x|^2 + 2$  auf dem vierten Arbeitsband ist, da diese Funktion voll zeitkonstruierbar ist (vergleiche [12]), nur Zeit  $2 \cdot |x|^2 + 2$  nötig. Tritt der Fall ein, daß  $t \leq 2 \cdot |x|^2 + 2$  gilt, so stoppt  $Q$  und hat  $O(|x|^2 \cdot \log_2(|x|))$  Schritte gemacht. Andernfalls ist  $t > 2 \cdot |x|^2 + 2$ . Hat  $Q$  bisher  $s$  Schritte gemacht, so ist der Inhalt seines dritten Arbeitsbandes  $s$  Zeichen lang. Dieser wird auf das erste Band kopiert und damit ausgegeben. Dazu sind nochmals  $2 \cdot s$  Schritte nötig. Da die Ausgabe aber in diesem Fall  $s$  Zeichen lang ist, ist die Laufzeit von  $Q$  bei Ausgabe  $x$  maximal  $O(|x|^3)$ .

Wir sagen im folgenden, daß eine Münzwurf-Maschine  $M$  eine Dichte  $\gamma$  in *quadratischer Zeit generiert*, wenn es eine Konstante  $c > 0$  gibt, so daß für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt: Alle Berechnungen von  $M$  bei Eingabe  $\varepsilon$ , die zur Ausgabe von  $x$  führen, haben maximale Länge  $\max\{c, 2 \cdot |x|^2 + 2\}$ .

*Behauptung 2:*

*Sei  $\gamma$  eine Dichte, die von einer Münzwurf-Maschine mit nur einem Arbeitsband in quadratischer Zeit generiert wird. Dann gibt es eine Münzwurf-Maschine  $M_i$  aus obiger Aufzählung, so daß für die von  $Q$  bei Eingabe  $M_i$  erzeugte Dichte  $\gamma'_i$  und für fast alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:*

$$\gamma'_i(x) = \gamma(x).$$

Sei  $M_i$  die Münzwurf-Maschine mit nur einem Arbeitsband, die  $\gamma$  in quadratischer Zeit generiert. Dann gilt für fast alle Ausgaben  $x$  von  $M_i$  und alle Berechnungen, die zu dieser Ausgabe führen, daß die Länge der jeweiligen Berechnung  $t$  die Ungleichung

$$t \leq 2 \cdot |x|^2 + 2$$

erfüllt. Daher gibt  $Q$  nach Konstruktion bei Eingabe  $M_i$  genau die bei der Simulation von  $M_i$  berechneten Ausgaben von  $M_i$  aus, d.h. für alle  $x$ , zu deren Ausgabe  $M_i$  maximal  $2 \cdot |x|^2 + 2$  Schritte benötigt, gilt

$$\gamma'_i(x) = \gamma(x).$$

*Behauptung 3:*

Sei  $\delta$  eine Dichte auf  $\mathbb{N}_0$  mit  $\text{SUPPORT}(\delta) = \mathbb{N}_0$ . Wenn es eine Münzwurf-Maschine  $M$  und eine Konstante  $c > 0$  gibt, so daß  $M$  nur Ausgaben aus  $\{1\}^*$  liefert und bei Ausgabe  $1^i$ ,  $i \in \mathbb{N}_0$ , maximal  $c \cdot i + c$  Schritte macht und  $1^i$  mit Wahrscheinlichkeit  $\delta(i)$  ausgibt, dann gibt es eine Dichte  $\tau \in \text{Vgen}(\text{Pol}, \mathcal{F})$  mit

$$\tau(x) \geq \frac{1}{2} \cdot \left( \left( \sum_{\substack{i \in \mathbb{N}_0 \\ m(i) < |x|}} \delta(i) \cdot \gamma'_i(x) \right) + \delta(|x|) \cdot \frac{1}{2^{|x|}} \right)$$

für alle  $x \in \Sigma^*$ , wobei  $m(i) = c \cdot i + c + t(i)$ .

Wir geben eine Münzwurf-Maschine an, die eine solche Dichte  $\tau$  generiert.

**Algorithmus 5.22**

<i>BEGIN</i>	(1)
Wähle $b \in \{0, 1\}$ zufällig und gleichverteilt per Münzwurf;	(2)
Wähle ein $i \in \mathbb{N}_0$ mit Hilfe von $M$ ; notiere die Zahl der gemachten Schritte parallel dazu unär auf einem zusätzlichen Arbeitsband;	(3)
IF $b = 0$	(4)
<i>THEN</i> Starte die Maschine $E$ an der Eingabe $i$ und notiere parallel dazu die Zahl der benötigten Schritte dieser Berechnung unär auf dem zusätzlichen Arbeitsband;	(5)
Sei $M_i$ die dabei erhaltene Münzwurf-Maschine;	(6)
Starte $Q$ mit der Eingabe $M_i$ ;	
Sei $x$ die dabei erhaltene Ausgabe;	
Sei $m$ der notierte Wert auf dem zusätzlichen Arbeitsband;	
IF $ x  > m$	(7)
<i>THEN</i> Gib $x$ aus;	(8)
<i>ELSE</i> Gib den String $0^{m(i)}$ aus;	(9)
<i>ELSE</i> Wähle einen $i$ Bits langen Zufallsstring $y$ und gib diesen aus;	(10)
<i>END</i>	(11)

Sei  $i$  die Zahl, die in Schritt (3) gewählt wird. Auf dem zusätzlichen Arbeitsband der Maschine wird maximal der Wert  $t(i) + c \cdot i + c$  protokolliert, da  $c \cdot i + c$  bzw.  $t(i)$  die entsprechenden maximalen Laufzeiten zum Generieren von  $i$  bzw. zum Berechnen von  $M_i$  sind. Somit ist in Schritt (6)

$$m \leq m(i).$$

Schritt (2) kann in einem Übergang realisiert werden, Schritt (3) wird nach Voraussetzung in Zeit  $t_1 \leq c \cdot i + c$  durchgeführt. Man beachte dabei, daß die Berechnungen von  $M$  nicht simuliert werden müssen, denn  $M$  kann in die Übergangstabelle der Gesamtmaschine eingebaut werden. Schritt (4) kann wiederum in  $O(1)$  Zeit durchgeführt werden. In Schritt (5) sind  $t_2 \leq t(i)$  Übergänge nach Definition der Funktion  $t$  nötig. Es ist  $t_1 + t_2 = m$ . Schritt (6) benötigt gemäß der ersten Behauptung  $O(|x|^3)$  Übergänge, wenn die Ausgabe in diesem Schritt  $x$  ist. Schritt (7) kann in  $O(m)$  Schritten realisiert werden. Schritt (8) bzw. Schritt (9) sind in linearer Zeit in der Länge der Gesamtausgabe durchführbar. Schritt (10) ist in Zeit  $O(i)$  realisierbar.

Erzeugt die Münzwurf-Maschine in Schritt (8) oder (9) die Ausgabe, so ist die Laufzeit maximal  $O(m + |x|^3) = O(|x|^3)$  in dieser Ausgabe. Wird die Ausgabe dagegen in Schritt (10) erzeugt, so wurden bis dahin maximal  $c \cdot i + c + O(1)$  Schritte gemacht, die Ausgabe hat aber Länge  $i$ . Daher ist die Laufzeit der Gesamtmaschine durch  $O(|x|^3)$  beschränkt, wenn die Ausgabe  $x$  ist.

Es bleibt zu zeigen, daß die generierte Dichte  $\tau$  die Ungleichung

$$\tau(x) \geq \frac{1}{2} \cdot \left( \left( \sum_{\substack{i \in \mathbb{N}_0 \\ m(i) < |x|}} \delta(i) \cdot \gamma'_i(x) \right) + \delta(|x|) \cdot \frac{1}{2^{|x|}} \right)$$

für alle  $x \in \Sigma^*$  erfüllt.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Ausgabe in Schritt (8) oder (9) generiert wird, ist  $\frac{1}{2}$ . Ebenso ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Ausgabe in Schritt (10) generiert wird,  $\frac{1}{2}$ . Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß in Schritt (6) mittels der Maschine  $M_i$  der Wert  $x$  berechnet wird, ist

$$\delta(i) \cdot \gamma'_i(x).$$

Falls für dieses  $x$  gilt  $|x| > m$ , so wird dieses  $x$  ausgegeben. Da  $m \leq m(i)$  gilt, ist die Wahrscheinlichkeit, daß  $x$  in Schritt (8) ausgegeben wird, mindestens

$$\frac{1}{2} \cdot \left( \sum_{\substack{i \in \mathbb{N}_0 \\ m(i) < |x|}} \delta(i) \cdot \gamma'_i(x) \right).$$

Weiter ist für alle  $x$  die Wahrscheinlichkeit dafür, daß  $x$  in Schritt (10) ausgegeben wird,

$$\frac{1}{2} \cdot \delta(|x|) \cdot \frac{1}{2^{|x|}}.$$

Daraus folgt, daß für alle  $x$  die Wahrscheinlichkeit  $\tau(x)$ , daß  $x$  ausgegeben wird,

$$\tau(x) \geq \frac{1}{2} \cdot \left( \left( \sum_{\substack{i \in \mathbb{N}_0 \\ m(i) < |x|}} \delta(i) \cdot \gamma'_i(x) \right) + \delta(|x|) \cdot \frac{1}{2^{|x|}} \right)$$

beträgt. Damit ist Behauptung 3 bewiesen.

*Behauptung 4:*

*Es gibt eine Dichte  $\delta$  auf  $\mathbb{N}_0$  mit  $SUP(\delta) = \mathbb{N}_0$ , für die eine Münzwurf-Maschine  $M$  und ein  $c > 0$  existiert, so daß  $M$  bei Eingabe  $\varepsilon$  die Ausgaben der Form  $1^i$ ,  $i \in \mathbb{N}_0$ , mit Wahrscheinlichkeit  $\delta(i)$  in maximal  $c \cdot i + c$  Schritten generiert.*

Die von folgendem Algorithmus generierte Dichte hat die behaupteten Eigenschaften.

**Algorithmus 5.23**

<i>BEGIN</i>	(1)
Wähle $b \in \{0, 1\}$ zufällig per Münzwurf;	(2)
Setze $i = 0$ ;	(3)
<i>WHILE</i> $b = 1$	(4)
Setze $i = i + 1$ ;	(5)
Wähle $b \in \{0, 1\}$ zufällig per Münzwurf;	(6)
Gib $1^i$ aus;	(7)
<i>END</i>	(8)

Offensichtlich ist die Laufzeit  $O(i)$ , und alle  $1^i$ ,  $i \in \mathbb{N}_0$ , werden mit positiver Wahrscheinlichkeit ausgegeben.

*Behauptung 5:*

*Sei  $\tau$  eine Dichte, die die Bedingungen der 3. Behauptung erfüllt. Für alle Dichten  $\mu$ , die in quadratischer Zeit von einer Münzwurf-Maschine mit nur einem Arbeitsband generiert werden, gibt es dann eine Konstante  $d > 0$ , so daß für alle  $x \in \Sigma^*$  gilt:*

$$d \cdot \tau(x) \geq \mu(x).$$

*Somit begrenzt  $\tau$  insbesondere alle in quadratischer Zeit generierbaren Dichten polynomiell.*

Offensichtlich ist  $\tau(x) > 0$  für alle  $x \in \Sigma^*$ . Da es zu allen Dichten  $\gamma$ , die in quadratischer Zeit von einer Münzwurf-Maschine mit nur einem Arbeitsband generiert werden können, gemäß Behauptung 2 ein  $i \in \mathbb{N}_0$  und  $N \in \mathbb{N}_0$  gibt, so daß  $\gamma(x) = \gamma'_i(x)$

für alle  $|x| \geq N$  gilt, folgt nach Behauptung 3 für alle  $|x| \geq \max\{m(i) + 1, N\}$ :

$$\tau(x) \geq \frac{1}{2} \cdot \delta(i) \cdot \gamma'_i(x) = \frac{1}{2} \cdot \delta(i) \cdot \gamma(x).$$

Für die Menge der  $x$  mit  $|x| < \max\{m(i) + 1, N\}$  gibt es eine Konstante  $d$  mit  $\tau(x) \geq d \cdot \gamma(x)$ , da  $SUP(\tau) = \Sigma^*$ .

*Behauptung 6:*

Sei  $L_1 \in \mathcal{NP}$ ,  $\mu \in Vgen(Pol, \mathcal{F})$ . Dann gibt es ein  $L_2 \in \mathcal{NP}$  und eine Dichte  $\gamma$ , die von einer deterministischen Turingmaschine mit nur einem Arbeitsband in quadratischer Zeit generiert werden kann, derart, daß es eine Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$  von  $(L_1, \mu)$  auf  $(L_2, \gamma)$  gibt.

Sei  $t \geq 2$  so gewählt, daß  $\mu$  in Zeit  $|x|^t + t$  von einer Münzwurf-Maschine  $M$  mit nur einem Arbeitsband generiert wird. Man beachte dabei, daß jede Dichte, die in polynomieller Zeit von einer Münzwurf-Maschine mit mehr als einem Arbeitsband generiert wird, gemäß dem aus der klassischen Komplexitätstheorie bekannten Satz über die Simulation von Mehrbandmaschinen durch Einbandmaschinen auch in polynomieller Zeit von einer Münzwurf-Maschine mit nur einem Arbeitsband generiert werden kann. (Siehe Satz 4.2.)

Setze

$$L_2 = \{x01^c : c = |x|^t + t - |x| - 1 \text{ und } x \in L_1\}$$

und

$$\gamma(y) = \begin{cases} \mu(x) & \text{falls } y = x01^k \text{ und } |x|^t + t = |y|, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Weiter sei

$$f(x) = x01^c,$$

wobei  $c = |x|^t + t - |x| - 1$ . Dann ist  $f(x) \in L_2$  genau dann, wenn  $x \in L_1$ , und offensichtlich kann  $f$  in P-Zeit von einer deterministischen Turingmaschine berechnet werden. Darüber hinaus gilt

$$|x| = |y| \iff |f(x)| = |f(y)|,$$

und  $f$  ist injektiv. Es gilt sogar

$$\gamma = \mu_f.$$

Da  $R$  glatt ist, folgt daraus, daß  $f$  eine Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$  ist.

Weiter ist  $L_2 \in \mathcal{NP}$  und  $\gamma$  kann wie folgt in quadratischer Zeit generiert werden. Dazu betrachte man zunächst folgenden Algorithmus, der von einer Turingmaschine

$T$  mit zwei Arbeitsbändern ausgeführt wird:

**Algorithmus 5.24**

<i>BEGIN</i>	(1)
Starte $M$ an Eingabe $\varepsilon$ auf dem zweiten Arbeitsband; sei $x$ das Ergebnis der Berechnung;	(2)
Berechne auf dem ersten Arbeitsband $1^{ x ^t+t}$ und überschreibe die ersten $ x  + 1$ Bandfelder mit $x \circ 0$ ;	(3)
Ausgabe ist der Inhalt des ersten Arbeitsbandes;	(4)
<i>END</i>	(5)

Der Algorithmus gibt nur Ausgaben der Form  $y = x01^c$  mit  $c = |x|^t + t - |x| - 1$  aus und macht dabei  $O(|x|^t + t) = O(|y|)$  Schritte. Analog dem Beweis zum zweiten Teil des Bandreduktionssatzes 4.2 läßt sich zeigen, daß es eine Münzwurf-Maschine  $\tilde{T}$  mit nur einem Arbeitsband gibt, die die gleiche Dichte generiert, dabei aber nur ebensoviele Münzwürfe wie  $T$  macht und in Zeit  $O(|y|^2)$  in Abhängigkeit von der Ausgabe rechnet. Somit macht  $\tilde{T}$  nur  $O(|y|)$  viele Münzwürfe in Abhängigkeit von der Ausgabe. Benutzt man den Beweis zum Satz über lineare Beschleunigung 4.3 so kann man zeigen, daß es dann eine Münzwurf-Maschine gibt, die nur  $2 \cdot |y|^2$  Schritte bei fast allen Ausgaben  $y$  benötigt. Dabei ist wichtig, daß die Zahl der Münzwürfe nur  $O(|y|)$  beträgt, da diese Schritte in der Berechnung von  $\tilde{T}$  nicht beschleunigt werden können. (Darüber hinaus beachte man, daß bei Anwendung der Technik der linearen Beschleunigung zunächst die Ausgabe  $y$  in komprimierter Form in Zeit  $|y|^2$  für fast alle Ausgaben  $y$  berechnet wird. Dann wird aus dieser komprimierten Form die korrekte Ausgabe berechnet. Dazu sind für fast alle Ausgaben  $y$  wiederum nur  $|y|^2$  Schritte nötig. Somit ist die Gesamtlaufzeit durch  $2 \cdot |y|^2$  für fast alle Ausgaben  $y$  beschränkt.) Damit ist Behauptung 6 bewiesen.

Sei im folgenden  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  eine in polynomieller Zeit berechenbare und invertierbare Pairing-Funktion, und sei

$$\rho(y) = \begin{cases} \frac{c'}{|M|^{2 \cdot 2^{|M|}}} \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \tau(x) & \text{falls } y = \langle M, x01^k \rangle \text{ und } M \text{ Kodierung einer} \\ & \text{nichtdeterministischen Turingmaschine ist,} \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

eine Dichte auf  $\Sigma^*$ . Dabei ist  $\tau$  die in Behauptung 3 bezeichnete Dichte und  $c'$  die Normierungskonstante. Bei geeigneter Wahl der Kodierung für die nichtdeterministischen Turingmaschinen ist  $\rho \in Vgen(Pol, \mathcal{F})$ , da  $\tau \in Vgen(Pol, \mathcal{F})$  gilt. (Eine solche geeignete Kodierung erhält man zum Beispiel folgendermaßen: Ist  $\{T_i\}_{i \in \mathbb{N}_0}$  eine rekursive Aufzählung von Kodierungen aller nichtdeterministischen Turingmaschinen und ist  $G$  eine deterministische Turingmaschine, die bei Eingabe  $1^i, i \in \mathbb{N}_0$ , in Zeit  $s(i)$  genau  $T_i$  ausgibt, so kann man daraus eine rekursive Aufzählung aller nichtdeterministischen Turingmaschinen in einer anderen Kodierung konstruieren, so daß die Kodierungen der nichtdeterministischen Turingmaschinen in polynomieller Zeit in Abhängigkeit von der Ausgabelänge generiert werden können. Dazu

wird die  $i$ -te nichtdeterministische Turingmaschine statt durch  $T_i$  durch den String  $T'_i = T_i 10^{s(i)}$  kodiert. Generiert wird diese Aufzählung folgendermaßen: Parallel wird bei Eingabe  $1^i$  die Maschine  $G$  auf dem ersten Arbeitsband gestartet und auf dem zweiten Arbeitsband wird Protokoll über die Zahl der von  $G$  gemachten Schritte geführt. Hält  $G$ , so wird hinter die Ausgabe  $10^t$  geschrieben, wobei  $t$  die Zahl der von  $G$  gemachten Schritte ist.)

*Behauptung 7:*

Ist  $L \in \mathcal{NP}$  und ist  $\gamma$  eine in quadratischer Zeit von einer Münzwurf-Maschine mit nur einem Arbeitsband generierbare Dichte, so gibt es eine Polynomzeitreduktion bezüglich  $R$  von  $(L, \gamma)$  auf  $(BH, \rho)$ , wobei  $\rho$  die oben bezeichnete Dichte und  $BH$  die aus dem Beweis zu Satz 5.17 bekannte Sprache Bounded Halting ist.

Zu  $L$  gibt es eine nichtdeterministische Turingmaschine  $M_L$ , die  $L$  in Zeit  $t + |\cdot|^t$  für ein geeignetes  $t \geq 2$  akzeptiert. Setze für alle  $x \in \Sigma^*$

$$g(x) = \langle M_L, x01^c \rangle,$$

wobei  $c = t + |x|^t - |x|$  ist. Es ist  $g(x) \in BH$  genau dann, wenn  $M_L$  die Eingabe  $x$  in maximal  $t + |x|^t$  Schritten akzeptiert. Dies gilt aber genau dann, wenn  $x \in L$ . Darüber hinaus ist

$$|g(x)| = |M_L| + 1 + t + |x|^t.$$

Somit gilt

$$|x| = |y| \iff |g(x)| = |g(y)|.$$

Außerdem ist  $g$  injektiv, und es gilt

$$\gamma_g(y) = \begin{cases} \gamma(x) & \text{falls } y = \langle M_L, x01^c \rangle \text{ und } c = t + |x|^t - |x|, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Da  $\gamma$  in quadratischer Zeit in der Länge der Ausgabe generierbar ist, ist  $\gamma_g$  ebenfalls in quadratischer Zeit generierbar: Sei dazu  $G$  die Münzwurf-Maschine mit nur einem Arbeitsband, die  $\gamma$  in quadratischer Zeit generiert.

Folgende Münzwurf-Maschine  $T$  generiert  $\gamma_g$  in linearer Zeit in Abhängigkeit von der Ausgabe, benutzt aber mehr als ein Arbeitsband. Zuerst wird  $M_L$  auf das erste Arbeitsband geschrieben, danach wird  $x$  mittels  $G$  generiert und

$$t + |x|^t - |x|$$

unär berechnet. Dies ist in Zeit  $t + |x|^t - |x|$  möglich, da diese Funktion voll zeitkonstruierbar ist (siehe [12]). Dann wird hinter  $M_L$  und  $x$  der String  $01^c$  mit  $c = t + |x|^t - |x|$  geschrieben und die Pairing-Funktion auf diesen String angewandt. Dadurch ergibt sich eine Gesamtlaufzeit von maximal  $O(|x|^t)$  Schritten. Die Ausgabe  $y$  hat aber Länge  $|x|^t$ . Somit ist die Laufzeit bei Ausgabe  $y$  durch  $O(|y|)$  beschränkt.

Ebenso wie im Beweis von Behauptung 6 kann man die Techniken zum Beweis des Bandreduktionssatzes 4.2 und des linearen Beschleunigungssatzes 4.3 anwenden, um

zu zeigen, daß aus der Existenz von  $T$  folgt, daß es auch eine Münzwurf-Maschine  $T'$  gibt, die  $\gamma_g$  in quadratischer Zeit generiert und dazu nur ein Arbeitsband benötigt. Wir zeigen, daß  $\rho$  die Dichte  $\gamma_g$  polynomiell begrenzt. Nach Behauptung 5 gibt es eine Konstante  $d > 0$ , so daß für alle  $x \in \Sigma^*$

$$d \cdot \tau(x) \geq \gamma(x)$$

gilt. Für  $y = g(x)$  gilt  $y = \langle M_L, x \rangle^{1^c}$  mit  $c = t + |x|^t - |x|$ . Daraus folgt für alle  $y \in g(\Sigma^*)$

$$\begin{aligned} \rho(y) &\geq d' \cdot \frac{1}{c^2} \cdot \tau(x) \\ &\geq d' \cdot \frac{1}{|x|^{2 \cdot t}} \cdot \tau(x) \\ &\geq \frac{d'}{d} \cdot \frac{1}{|x|^{2 \cdot t}} \cdot \gamma(x) \\ &= \frac{d'}{d} \cdot \frac{1}{|x|^{2 \cdot t}} \cdot \gamma_g(y), \end{aligned}$$

wobei  $d'$  eine geeignete (nur von  $M_L$  abhängige) Konstante ist. Somit begrenzt  $\rho$  die Dichte  $\gamma_g$  polynomiell.

Also ist  $g$  eine Polynomzeitreduktion von  $(L, \gamma)$  auf  $(BH, \rho)$ . Damit ist Behauptung 7 bewiesen.

Gemäß Satz 5.2 ist die Hintereinanderausführung  $g \circ f$  der Polynomzeitreduktionen  $g$  und  $f$  aus den Beweisen zu Behauptung 6 und 7 eine Polynomzeitreduktion von  $(L, \mu)$  auf  $(BH, \rho)$ . Darüber hinaus ist  $BH \in \mathcal{NP}$  und  $\rho \in Vgen(Pol, \mathcal{F})$ . Somit ist  $(BH, \rho)$  vollständig bezüglich  $R$  in  $\mathcal{T}$ . Damit ist die Behauptung des Satzes bewiesen. ■

In [1] wurde dieser Satz für das Levinsche Modell vorgestellt. Wir erweitern zum Beweis unseres allgemeineren Satzes Techniken aus der dort und in [2] dargestellten Beweisskizze. Darüber hinaus war es uns möglich, in diesen Skizzen nicht gelöste Detailprobleme selbst zu lösen, so zum Beispiel die Frage, wie man die Dichte  $\tau$  konstruieren muß, damit sie in polynomieller Zeit generiert werden kann.

Analog zu obigem Beweis zeigt man die folgenden Sätze:

**Satz 5.25** *Seien  $\mathcal{T} = \{(L, \mu) : L \in PSpace, \mu \in Vgen(Pol, \mathcal{F})\}$  und  $R$  ein glattes schwaches average-case Modell. Dann gibt es ein Paar  $(L, \mu)$ , das vollständig bezüglich  $R$  in  $\mathcal{T}$  ist.*

Zum Beweis dieser Aussage genügt es, Behauptung 7 des obigen Beweises so zu modifizieren, daß statt  $BH$  die Sprache  $BP$ , die in Gleichung (5.10) definiert wurde, und eine entsprechend veränderte Dichte  $\rho$  verwendet wird. (In der Definition von  $\rho$  stehen dann anstelle der nichtdeterministischen Turingmaschinen deterministische Turingmaschinen.)

Verwendet man statt  $BH$  in der 7. Behauptung des obigen Beweises die Sprache  $EBH$  und eine auf geeignete Weise veränderte Dichte  $\rho$ , so kann man den folgenden Satz zeigen:

**Satz 5.26** Sei  $\mathcal{T} = \{(L, \mu) : L \in DExpTime, \mu \in Vgen(Pol, \mathcal{F})\}$ . Sei  $R$  ein glattes schwaches average-case Modell. Dann gibt es ein Paar  $(L, \mu)$ , das vollständig bezüglich  $R$  in  $\mathcal{T}$  ist.

# Literaturverzeichnis

- [1] Shai Ben-David, Benny Chor, Oded Goldreich, und Michael Luby. On the theory of average case complexity. In: *Proc. 21th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, Seiten 204 –216, 1989.
- [2] Shai Ben-David, Benny Chor, Oded Goldreich, und Michael Luby. On the theory of average case complexity. *Journal of Computer and System Sciences*, 44:193–219, 1992.
- [3] Ingrid Biehl und Johannes Buchmann. Introduction to theoretical cryptography. Nicht veröffentlicht, 1992.
- [4] Andreas Blass und Yuri Gurevich. On the reduction theory for average case complexity. In: *CSL'90, 4th Workshop on Computer Science Logic*, Seiten 17 – 30. Springer LNCS, 1991.
- [5] Ronald V. Book und Ding-Zhu Du. The existence and density of generalized complexity cores. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 34(3):718–730, Juli 1987.
- [6] Oded Goldreich. Towards a theory of average case complexity (a survey). Technical Report TR-531, Computer Science Department, Technion, Haifa, Israel, März 1988.
- [7] Yuri Gurevich. Average case completeness. *Journal of Computer and System Sciences*, 42(3):346 – 398, Juni 1991.
- [8] Yuri Gurevich. Average case complexity. In: J.L. Albert, B. Monier, und M.R. Artalejo, Editors, *Proc. ICALP '91. Automata, Languages and Programming. 18th International Colloquium*, Seiten 615 – 626. Springer LNCS510, 1991.
- [9] John E. Hopcroft und Jeffrey D. Ullman. *Introduction to automata theory, languages and computation*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1979.
- [10] David S. Johnson. The  $\mathcal{NP}$ -completeness column. *Journal of Algorithms*, 5:284 – 299, 1984.
- [11] Leonid Levin. Average case complete problems - extended abstract. In: *Proc. 16th ACM Symposium on Theory of Computing*, Seite 465, 1984.

- [12] Karl Rüdiger Reischuk. *Einführung in die Komplexitätstheorie*. B.G.Teubner Verlag, 1990.
- [13] Rüdiger Reischuk und Christian Schindelbauer. Precise average case complexity. Nicht veröffentlicht, Januar 1992.
- [14] Rainer Schuler und Tomoyuki Yamakami. Structural average case complexity - extended abstract. Nicht veröffentlicht, Januar 1992.
- [15] I. Nassi und B. Shneiderman. Flowchart techniques for structured programming. *SIGPLAN Notices*, (8):12–26, 1973.
- [16] Michael R. Garey und David S. Johnson. *Computers and Intractability*. W.H. Freeman and Company, 1979.
- [17] José Balcázar und Josep Diaz und Joaquim Gabarró. *Structural Complexity I*. Springer Verlag, 1988.
- [18] José Balcazár und Uwe Schöning. Bi-immune sets for complexity classes. *Mathematical System Theory*, 18:1–10, 1985.
- [19] H. S. Wilf. Some examples of combinatorial averaging. *American Mathematical Monthly*, 92:250–261, 1985.