

# Rekursionstheorie

HEIKE MILDENBERGER

SKRIPT ZU DER  
IM SOMMERSEMESTER 2006  
IN WIEN GEHALTENEN  
ZWEISTÜNDIGEN VORLESUNG „REKURSIONSTHEORIE“  
VERSION VOM 6.5.2019

Kapitel 1. Berechenbarkeit	1
Turing-Maschinen	2
$\mu$ -Rekursion	4
Primitiv rekursiv versus $\mu$ -rekursiv	6
van der Waerden-Zahlen	8
Kapitel 2. Die Normalform	15
Kapitel 3. Partielle rekursive Funktionen	21
Kapitel 4. Posts Problem, die “finite injury” Methode	35
Kapitel 4. Die “infinite injury priority” Methode	47
Literaturverzeichnis	49



## KAPITEL 1

# Berechenbarkeit

Literatur: Bücher: [3], [5], [6], [2], [9].

Artikel: Shelah [8].

Es sei  $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$  die Menge der natürlichen Zahlen. Wir stellen uns unter einem Algorithmus eine endliche Folge von endlich langen Anweisungen vor. Eine Funktion  $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  heißt berechenbar, wenn es einen Algorithmus gibt, der für alle  $n \in \mathbb{N}$  auf Eingabe von  $n$  hin endlich viele Schritte lang rechnet (oder arbeitet) und dann  $f(n)$  ausgibt. Dies ist natürlich nur eine vage Beschreibung und noch keine Definition.

Wir beschäftigen uns in diesem Kapitel mit den folgenden Fragen:

1. Welche Funktionen  $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  sind berechenbar?
2. Hängt der Berechenbarkeitsbegriff gar von unserer Präzisierung des Begriffes „Algorithmus“ ab?
3. Welche Präzisierungen gibt es?

Wir beginnen mit der dritten Frage. Es gibt die folgenden mathematischen Definitionen für den oben unvollständig beschriebenen Begriff der Berechenbarkeit:

Turing-Berechenbarkeit,  
Berechenbarkeit durch Flussdiagramme,  
Registermaschinen-Berechenbarkeit,  
 $\mu$ -rekursive Funktionen,  
 $C^{++}$ -Programme, Prolog-Programme, Lisp-Programme, Basic-Programme,  
Java-Programme,  
Perl-Scripte

und viele mehr. Wir stellen eine Version der Turing-Berechenbarkeit vor, danach werden wir die  $\mu$ -Rekursivität definieren und den Satz von Turing (1936), daß jede  $\mu$ -berechenbare Funktion auch Turing-berechenbar ist, beweisen. Über etliche andere Präzisierungen können Sie im Buch von Odifreddi lesen. Die Churchsche These (Alonzo Church, 1936) sagt, dass alle Präzisierungen der Berechenbarkeit äquivalent sind. Aus Zeitgründen betrachten wir nur zwei Präzisierungen und zunächst nur eine Richtung des Beweises, dass die beiden äquivalent sind. Die Technik dieses Beweises, nämlich die Simulierung jedes der endlich vielen Befehlstypen einer Berechnungsart durch eine Kombination von Befehlen in der anderen Berechnungsart, ist repräsentativ für alle effektiven Übersetzungen.

## 1. Turing-Maschinen

DEFINITION 1.1. Turing 1936, Post 1936. Eine Turing-Maschine  $M$  besteht aus

- (1) einem endlichen Alphabet  $\mathbb{A} = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$  mit zwei ausgezeichneten Buchstaben:  $s_0$  steht für das leere Zeichen, und  $s_1 = 1$  steht für den Zähler. Die beiden ausgezeichneten Zeichen müssen unterschiedlich sein.
- (2) einer endlichen Menge  $\{q_0, q_1, \dots, q_n\}$  von Zuständen, worunter es wieder zwei besondere Zustände gibt:  $q_0$ , den Anfangszustand, und  $q_f$ , den Endzustand. Wieder gilt, dass es mindestens zwei Zustände geben muss.
- (3) einer endlichen konsistenten Programmtafel  $\{I_0, I_1, \dots, I_n\}$ . Jedes  $I_j$  ist von einer der drei folgenden Sorten:

$(q_a, s_b, s_c, q_d)$ : falls im Zustand  $q_a$  auf dem Arbeitsfeld  $s_b$  steht, schreibe stattdessen  $s_c$  und gehe in den Zustand  $q_d$ .

$(q_a, s_b, R, q_d)$ : falls im Zustand  $q_a$  auf dem Arbeitsfeld  $s_b$  steht, gehe mit dem Lesekopf eins nach rechts und in den Zustand  $q_d$ .

$(q_a, s_b, L, q_d)$ : selbes für links.

Eine Programmtafel heißt konsistent, wenn sie nicht zwei  $I_j$  mit identischen  $q_a, s_b$  und unterschiedlichen Fortsetzungen enthält.

ÜBUNG 1.2. *Wir halten ein Alphabet  $A$  und eine Zustandsmenge  $Z$  fest. Wieviele Turing-Maschinen gibt es über  $A$  und  $Z$ ?*

ÜBUNG 1.3. *Überlegen Sie sich, wann zwei Turing-Maschinen isomorph sind. Wieviele Turing-Maschinen gibt es insgesamt modulo Isomorphie?*

DEFINITION 1.4. Eine Konfiguration einer Turing-Maschine ist ein endlich langes Tupel der Form

$$(\sigma_0, \dots, \sigma_j, q_a, \sigma_{j+1}, \dots, \sigma_z).$$

Hierbei sind die Einträge  $\sigma_i \in \mathbb{A}$ . Der Lesekopf steht auf  $\sigma_j$  und die Maschine ist im Zustand  $q_a$ . Links von  $\sigma_0$  und rechts von  $\sigma_z$  stehen nur Leerzeichen  $s_0$  auf dem Band, das mindestens nach rechts unendlich lang ist.

DEFINITION 1.5. Turing 1936, Post 1936. Sie  $n \geq 1$ . Eine Funktion  $f: \mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $f(x_1, \dots, x_n)$  ist Turing-berechenbar wenn es ein Turing-Maschine gibt, die für alle  $x_i$  beginnend in der Konfiguration  $(s_0, x_1, s_0, x_2, s_0, \dots, s_0, x_n, s_0, q_0)$  nach Befolgen der Befehle in der Turingtafel nach endlich vielen Schritten die Endstellung  $(s_0, f(x_1, \dots, x_n), s_0, q_f)$  erreicht. Hierbei stehen nicht die Zahlen  $x_i \in \mathbb{N}$  auf dem Band, sondern es steht auf  $x_i$  aufeinanderfolgenden Feldern jeweils der Zähler  $s_1$  auf dem Turingband, denn das Alphabet ist ja nur endlich. Wir notieren die Zahlen  $x_i$  also unär.

ÜBUNG 1.6. *Wieviele Funktionen  $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  gibt es? Folgern Sie: Es gibt Funktionen, die nicht Turing-berechenbar sind.*

LEMMA 1.7. *Die Identität auf  $\mathbb{N}$  ist Turing-berechenbar.*

Beweis: Wir skizzieren ein Flussdiagramm:

Suche nach der am weitestesten rechts stehende 1, die vom Input geblieben ist, und schreibe eine 2

War sie die letzte?

Falls ja, stelle den Input wieder her und gehe an das rechte Ende des Outputs und eins weiter und stoppe.

Falls nein, gehe zur rechtesten 1 im Output. Gehe eine Zelle nach rechts und drucke eine 1. Gehe zurück über einen Eintrag  $s_0$  zum Rest des Inputs und zu Zeile 1.

Nun wird dies in eine Turing-Maschine mit drei Buchstaben und 11 Zuständen übersetzt:

$q_0 s_0 L q_1$   
 $q_1 s_0 R q_9$  (leeres Wort?)  
 $q_9 s_0 R q_{10}$   
 $q_{10} s_0 R q_f$   
 $q_1 s_2 L q_1$   
 $q_1 s_1 s_2 q_2$  (die rechteste noch verbleibende 1 des Inputs wird durch 2 ersetzt)  
 $q_2 s_2 L q_2$   
 $q_2 s_0 R q_3$  (letzte 1 des Inputs weg)  
 $q_2 s_1 s_1 q_4$   
 $q_4 s_1 R q_4$  (Bewegung ans rechte Ende mit Wissen ums Zurückkehren)  
 $q_4 s_2 R q_4$   
 $q_4 s_0 R q_5$   
 $q_5 s_1 R q_5$   
 $q_5 s_0 s_1 q_6$  (eins an den Output)  
 $q_6 s_1 L q_6$   
 $q_6 s_0 L q_1$   
 $q_3 s_2 R q_3$  (die letzte Bewegung ans rechte Ende)  
 $q_3 s_2 s_1 q_3$   
 $q_3 s_0 R q_8$   
 $q_8 s_1 R q_8$   
 $q_8 s_0 s_1 q_9$  (letzte eins an den Output)  
 $q_9 s_1 R q_f$ <sup>1</sup>

□

---

<sup>1</sup>Andrew Brooke-Taylor found a Turing machine emulator on the web, and programmed an identity function for it. It only works if the tape is clean to start with. If you copy and paste the program from below into the “program” section (clicking my scroll-ball on my mouse was the only way I could get it to paste), set the “initial tape position” to be something large, and then put in \*1111\* or however many 1s you want as the initial characters, then hit “install program” and then “start”, it should work. Yay! The address is <http://ironphoenix.org/tril/tm/> and the program is

## 2. $\mu$ -Rekursion

Nun stellen wir eine weitere Möglichkeit einer mathematischen Definition der Berechenbarkeit vor. Diese wurde im selben Jahr 1936 von Kleene gefunden.

DEFINITION 1.8. Dedekind 1888. Eine Funktion  $f$  wird aus  $g$  und  $h$  durch primitive Rekursion definiert, wenn

$$\begin{aligned} f(\vec{x}, 0) &= g(\vec{x}), \\ f(\vec{x}, y + 1) &= h(\vec{x}, y, f(\vec{x}, y)). \end{aligned}$$

DEFINITION 1.9. Dedekind 1888, Skolem 1923, Gödel 1931. Die Menge der primitiv-rekursiven Funktionen ist die kleinste Menge von Funktionen, die

- (1) die Ausgangsfunktionen  $o(x) = 0$ ,  $s(x) = x + 1$ , und für alle  $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$  für  $i < n$  die Projektionsfunktionen  $p_i^n(x_0, \dots, x_{n-1}) = x_i$  enthält und
- (2) unter Verkettung abgeschlossen ist, d. h., wenn  $g_0, \dots, g_{m-1}$  und  $h$  in der Menge sind, dann ist auch  $f(\vec{x}) = h(g_0(\vec{x}), \dots, g_{m-1}(\vec{x}))$  in der Menge und
- (3) unter primitiver Rekursion abgeschlossen ist.

Ein Prädikat  $R \subseteq \mathbb{N}$  heißt primitiv rekursiv, wenn seine charakteristische Funktion primitiv rekursiv ist.

Warum tritt in  $h$  bei der primitiven Rekursion nur der letzte Wert von  $f$  auf, dürfte man nicht auch auf frühere Werte zurückgreifen?

ÜBUNG 1.10. *Die Addition und die Multiplikation und die Exponentiation auf den natürlichen Zahlen sind zweistellige primitiv-rekursive Funktionen.*

---

1, \*, 2, >  
 1, 1, 1, >  
 2, \*, 5, <  
 2, 1, 3, 2  
 2, 2, 2, >  
 3, \*, 4, <  
 3, 2, 3, <  
 4, -, 1, 1  
 4, 1, 4, <  
 5, \*, 6, <  
 5, 1, 5, <  
 5, 2, 5, 1  
 6, -, 7, \*  
 6, 1, 6, <

**2.1. Arithmetisierung, Kodierung von Folgen, Komponenten aus Folgen, Längen.** Seien  $p_1, p_2 \dots$  die Primzahlen in aufsteigender Reihenfolge, und sei

$$\langle n_0, \dots, n_{m-1} \rangle = \prod_{i=0}^{m-1} p_i^{n_i+1} = p$$

unsere Injektion aller endlichen Folgen natürlicher Zahlen in die natürlichen Zahlen (Sie können eine andere rekursive Injektion wählen.) Die Dekodierungsfunktionen: Länge, Komponente, Folge, Verkettung und Anfangsstück, sind auch primitiv-rekursiv:

$$\begin{aligned} \lg(x) &= \text{das größte } n \leq x, \text{ so daß } p_{n-1} | x, \\ (x)_n &= (\text{das größte } r \leq x, \text{ so daß } r \geq 1 \wedge p_n^r | p) - 1 \\ &\quad (\text{—dies ist für } n \geq \lg(x) \text{ nicht definiert—}), \\ \text{Seq}(x) &\Leftrightarrow (\forall n \leq x)((x)_n \text{ definiert} \rightarrow n < \lg(x)), \\ x * y &= \prod_{i < \lg(x)} p_i^{(x)_i} \prod_{i < \lg(y)} p_{\lg(x)+i}^{(y)_i}, \\ x \sqsubseteq y &\Leftrightarrow \text{Seq}(x) \wedge \text{Seq}(y) \wedge (\exists u \leq y)(\text{Seq}(u) \wedge x * u = y). \end{aligned}$$

PROPOSITION 1.11. *Rekursion über den Werteverlauf (Skolem 1923, Péter 1934). Sei die Geschichtsfunktion definiert durch*

$$\hat{f}(\vec{x}, y) = \langle f(\vec{x}, 0), \dots, f(\vec{x}, y) \rangle.$$

Seien  $g$  und  $h$  primitiv-rekursiv und sei  $f$  definiert durch

$$\begin{aligned} f(\vec{x}, 0) &= g(\vec{x}), \\ f(\vec{x}, y+1) &= h(\vec{x}, y, \hat{f}(\vec{x}, y)). \end{aligned}$$

Dann ist  $f$  primitiv-rekursiv.

Beweis: Wir zeigen, daß  $\hat{f}$  primitiv-rekursiv ist. Da  $f(\vec{x}, y) = (\hat{f}(\vec{x}, y))_y$ , ist dann auch  $f$  primitiv-rekursiv.

$$\begin{aligned} \hat{f}(\vec{x}, 0) &= \langle f(\vec{x}, 0) \rangle \\ &= \langle g(\vec{x}) \rangle, \\ \hat{f}(\vec{x}, y+1) &= \langle f(\vec{x}, 0), \dots, f(\vec{x}, y+1) \rangle \\ &= \langle f(\vec{x}, 0), \dots, f(\vec{x}, y) \rangle * \langle f(\vec{x}, y+1) \rangle \\ &= \hat{f}(\vec{x}, y) * \langle h(\vec{x}, y, \hat{f}(\vec{x}, y)) \rangle. \end{aligned}$$

Also greift  $\hat{f}(\vec{x}, y+1)$  nur auf den vorigen Wert zurück, und  $\hat{f}$  ist primitiv-rekursiv, weil die Kodierung endlicher Folgen und die Verkettung primitiv-rekursiv sind.  $\square$

ÜBUNG 1.12. (Für Kenner). Die Menge der primitiv-rekursiven Funktionen enthält genau diejenigen Funktionen, deren Berechnung durch ein

*Flussdiagramm mit for-Schleifen und ohne Anfrage-Rauten und ohne while-Schleifen skizziert wird.*

DEFINITION 1.13. Kleene 1936. Eine Funktion  $f$  wird aus  $g$  durch eingeschränkte  $\mu$ -Rekursion definiert, wenn

$$\begin{aligned} (\mu 1) \quad & (\forall \vec{x})(\exists y)(g(\vec{x}, y) = 0), \\ (\mu 2) \quad & f(\vec{x}) = \min\{y \mid g(\vec{x}, y) = 0\} = \mu y(g(\vec{x}, y) = 0). \end{aligned}$$

BEMERKUNG 1.14. Übersehen Sie die nicht leicht überprüfbare Bedingung  $(\mu 1)$  nicht! Warum diese Bedingung so komplex ist, werden wir später sehen. Die Bedingung  $(\mu 1)$  heißt Einschränkung.

DEFINITION 1.15. Kleene 1936. Die Menge der  $\mu$ -rekursiven Funktion ist die kleinste Menge von Funktionen, die

- (1) die Ausgangsfunktionen  $o(x) = 0$ ,  $S(x) = x + 1$ ,  $p_i^n(\vec{x}) = x_i$  enthält und
- (2) unter Verkettung, primitiver Rekursion und unter eingeschränkter  $\mu$ -Rekursion abgeschlossen ist.

ÜBUNG 1.16. *In der Definition der  $\mu$ -Rekursivität kann man die primitive Rekursion weglassen, denn sie ist aus den anderen Aufbauschritten herstellbar, wenn man die Ausgangsfunktionen um  $+$ , Multiplikation und die charakteristische Funktion der  $<$ -Relation erweitert. Dieses wird im Logikbuch von Ziegler [10, Satz 16.1] ausführlich gezeigt.*

SATZ 1.17. Turing 1936. Jede  $\mu$ -rekursive Funktion ist Turing-berechenbar.

Beweis: Dies wird induktiv über den Aufbau der  $\mu$ -rekursiven Funktionen gezeigt. Wir zeigen mehr: es gibt eine Turing-Maschine, die die Funktion berechnet und den Input stehen lässt, so daß  $f(\vec{x})$  nach (d.h. rechts von) einem  $s_0$  und dem Input steht. Damit lässt sich die Induktion leichter durchführen.

Für die einstellige Identität haben wir dies schon oben in Lemma 1.7 gezeigt. Bei der Nullfunktion, der Nachfolgerfunktion und bei den Projektionen verfährt man ähnlich. Nun sind noch die Komposition, die primitive Rekursion und die  $\mu$ -Rekursion nachzurechnen. Wir zeigen dies exemplarisch für die primitive Rekursion.

Zu den Zeiten der Anfrage habe das Band folgende Form:

$$x_1 s_0 x_2 s_0 \dots s_0 x_n s_0 y s_0 s s_0 x_1 s_0 \dots s_0 x_n s_0 t s_0 f(\vec{x}, t)$$

Sei  $f(\vec{x}, 0) = g(\vec{x})$  und  $f(\vec{x}, y + 1) = h(\vec{x}, y, f(\vec{x}, y))$ , und seien  $g$  und  $h$  durch die TM  $M_1$  und  $M_2$  berechenbar. Wir führen zwei neue Zähler  $s$  und  $t$  ein, so daß jederzeit  $s + t = y$ . Am Anfang ist  $s = y$ . In jeder „Berechnungsrunde“ wird  $t$  um 1 erhöht und  $s$  um 1 erniedrigt.

Flussdiagramm:



Schreibe rechts des Inputs eine Kopie  $s$  von  $y$  und eine Kopie der  $x_i$  und  $t = 0$ .

Berechne  $f(\vec{x}, 0)$  durch  $M_1$ .

$s = 0$ ?

Falls  $s \neq 0$  erhöhe  $t$  um 1 und erniedrige  $s$  um 1 und berechne durch  $M_2$  mit dem hintersten  $\vec{x}$  und  $t + 1$  als Input den Wert  $z = h(\vec{x}, t, f(\vec{x}, t)) = f(\vec{x}, t + 1)$  und schreibe diesen direkt rechts neben das neue  $t + 1$ .

Gehe zur Frage.

Falls  $s = 0$ , lösche alles zwischen dem Input und  $z$  und schreibe  $z$  direkt neben den Input.

Nun muß man wieder mit viel Geduld das Flussdiagramm in eine Turing-Maschine umsetzen.  $\square$

Die Umkehrung gilt auch: jede Turing-berechenbar Funktion ist  $\mu$ -berechenbar. Wir werden später darauf zurückkommen. An unserer dritten Frage könnten wir das ganze Semester (und länger) arbeiten. Doch wir werden nicht nach enzyklopädischer Breite streben, sondern lieber interessante Phänomene und Meilensteine in der Entwicklung der Rekursionstheorie anschauen.

Durch lange Erfahrung wird die nicht-mathematische Antwort auf die zweite Frage gegeben durch:

THESE 1.18. *Church 1936. Alle Präzisierung des Berechenbarkeitsbegriffs sind äquivalent zur  $\mu$ -Rekursivität.*

Nun wenden wir uns der ersten Frage zu und schauen einige interessante Beispiele an.

### 3. Primitiv rekursiv versus $\mu$ -rekursiv

Braucht man den  $\mu$ -Operator überhaupt? Ist die Klasse (well, Menge) der primitiv-rekursiven Funktionen echt kleiner als die Klasse der  $\mu$ -rekursiven Funktionen? Diese Frage wurde um 1950 durch Rosza Péter gelöst. Grzegorzcyk führte 1953 eine Klassifizierung der primitiv-rekursiven Funktionen ein.

Wir definieren eine Funktion durch doppelte Rekursion:

DEFINITION 1.19. Die Ackermann-Funktion. Wir definieren  $A: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ :

$$\begin{aligned} A(0, y) &= y + 1 \\ A(x + 1, 0) &= A(x, 1) \\ A(x + 1, y + 1) &= A(x, A(x + 1, y)). \end{aligned}$$

ÜBUNG 1.20. *Die Ackermann-Funktion ist  $\mu$ -rekursiv.*

LEMMA 1.21. *Für jede primitiv-rekursive Funktion  $f$  gibt es ein  $m$ , so daß  $(\forall n) f(n) < A(m, n)$ .*

Beweisschritte:

$A(m, n) > n$  für alle  $n$ ,

$A(m + 1, n) \geq A(m, n + 1)$ ,

$A(m, n)$  ist monoton in  $n$ ,

$A(n, m)$  ist monoton in  $m$ ,

Ausgangsfunktionen  $\leq A(2, n)$ .

Wenn  $f \leq A(m, \cdot)$  und  $g \leq A(m', \cdot)$ , dann ist  $f \circ g \leq A(m + m' + 2, \cdot)$ ,

Wenn  $g \leq A(m, \cdot)$  und  $h \leq A(m, \cdot)$ , dann gilt für die primitive Rekursion  $f$  aus  $g$  und  $h$ ,  $f \leq A(m + 1, \cdot)$ . Den ausführlichen Beweis kann man in [6] nachlesen.  $\square$

**SATZ 1.22.** *Rosza Péter 1951. Die Ackermann-Funktion ist nicht primitiv rekursiv.*

Beweis: Wenn  $A(n, n)$  primitiv rekursiv wäre, so gäbe es nach dem obigen Lemma ein  $m$ , so dass für alle  $n$   $A(n, n) < A(m, n)$ . Nun nehmen wir  $n = m$  und erhalten einen Widerspruch.  $\square$

#### 4. Primitiv-rekursive obere Schranken für die van der Waerden-Zahlen

In diesem Abschnitt präsentieren wir Teile einer Arbeit von Saharon Shelah [8].

Wir stellen uns von nun an die natürlichen Zahlen in der von Neumannschen Form vor und haben also für jedes  $n$ :

$$n = \{0, 1, \dots, n - 1\}.$$

Falls Sie die von Neumannschen natürlichen Zahlen nicht kennen, fassen Sie die Gleichung als Definition auf. Diese Gleichung ist übrigens ein Grund dafür, warum es in vielen Situationen günstiger ist, mit 0 statt mit 1 zu zählen zu beginnen.

**DEFINITION 1.23.**  $P \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$  heißt arithmetische Progression der Länge  $t$ , wenn es  $r, s > 0$ , gibt, so daß  $P = \{r + s \cdot i \mid 0 \leq i < t\}$ .

**SATZ 1.24.** *van der Waerden 1927. Für alle positiven ganzen Zahlen  $n$  und  $c$  gibt es eine ganze Zahl  $N$ , so daß es für jede Färbung von  $\{1, 2, \dots, N\}$  in  $c$  Farben eine monochromatische arithmetische Progression der Länge  $n$  gibt.*

Wie groß sind die kleinsten  $N = W(n, c)$ , die van der Waerdens Satz bezeugen? Wir halten  $c$  fest. Ist  $n \mapsto W(n, c)$  eine primitiv-rekursive Funktion?

**ÜBUNG 1.25.** (a) *Wenn  $n \mapsto W(n, c)$  existiert, dann ist es eine  $\mu$ -rekursive Funktion.*

- (b) Wenn  $f$   $\mu$ -rekursiv ist und  $f \leq h$  (punktweise) ist und  $h$  primitiv-rekursiv ist, dann ist  $f$  primitiv-rekursiv. Hinweis: ein  $\mu$ -Operator mit einer primitiv-rekursiven Oberschranke des Suchbereichs für  $g(\vec{x}, y) = 0$  mit einem primitiv-rekursiven  $g$  kann durch primitiv-rekursiv Schritte simuliert werden.
- (c) Wenn  $f \leq g$  und  $g$  primitiv-rekursiv ist, dann ist  $f$  nicht unbedingt  $\mu$ -rekursiv. Hinweis: Nehmen Sie für  $f$  zum Beispiel die charakteristische Funktion des Halteproblems 3.22 oder auch das Problem  $K$  aus 3.25.

Shelahs Ergebnis wird eine etwas stärkere Ramsey-Eigenschaft behandeln. Hierzu brauchen wir die folgende Definition:

DEFINITION 1.26.  ${}^k n = \{\eta = (\eta(0), \dots, \eta(k-1)) \mid \eta(i) \in n\}$ . Sei  $1 \leq \ell \leq k$ . Wir werden  $\ell$ -parametrische Teilmengen von  ${}^k n$  definieren. Sei

$$k = A_0 \cup A_1 \cup \dots \cup A_\ell$$

eine Partition in nicht leere  $A_i$  für  $i < \ell$ ,  $A_\ell$  darf leer sein. Sei  $f: A_\ell \rightarrow n$  eine Funktion. Wir definieren  $\hat{f}: {}^\ell n \rightarrow {}^k n$  durch

$$\begin{aligned} \hat{f}(y_0, \dots, y_{\ell-1}) &= (x_0, \dots, x_{k-1}), \\ x_i &= f(i) \text{ für } i \in A_\ell \\ x_i &= y_j \text{ für } i \in A_j \text{ und } 0 \leq j < \ell. \end{aligned}$$

Eine  $\ell$ -parametrische Teilmenge von  ${}^k n$  ist die Bildmenge von  $\hat{f}$  bei einer Wahl von  $A_0, \dots, A_\ell, f$ .

Eine einparametrische Teilmenge heißt Gerade.

Beispiele mit  $\ell = 1$ :  $A_1 = \emptyset$ ,  $A_0 = k$ . Dann ist  $\hat{f}(y_0, \dots, y_{\ell-1}) = (y_0, \dots, y_0)$  der Länge  $k$ .

$A_1 = \{0, \dots, m-1, m+1, \dots, n-1, n+1, \dots, k-1\}$ ,  $A_0 = \{m, n\}$ . Dann ist  $\hat{f}(y_0, \dots, y_{\ell-1}) = (f(0), \dots, f(m-1), y_0, f(m+1), \dots, f(n-1), y_0, f(n+1), \dots, f(k-1))$ . Eine Gerade ist also eindimensional.

SATZ 1.27. Hales Jewett 1963. Für alle  $n, c$  gibt es eine Zahl  $HJ(n, c)$ , so daß für alle  $k \geq HJ(n, c)$  gilt: Wenn  ${}^k n$  mit  $c$  Farben gefärbt wird, dann gibt es eine monochromatische Gerade.

SATZ 1.28. Shelah 1988. Die Funktion  $(n, c) \mapsto HJ(n, c)$  ist primitiv rekursiv.

SATZ 1.29. Shelah 1988. Die Funktion  $(n, c) \mapsto W(n, c)$  ist primitiv rekursiv.

Beweis: Sei  $k = HJ(n, c)$ . Wie definieren  $\Psi: {}^k n \rightarrow (n-1)k$  durch  $\Psi(\eta) = \sum_{i < k} \eta(i)$ . Dann bildet  $\Psi$  jede Gerade in  ${}^k n$  auf eine arithmetische Progression der Länge  $n$  ab, daher ist  $W(n, c) \leq (n-1)HJ(n, c)$ .  $\square$

Nun zum Beweis von Satz 1.28. Wir führen die Grzegorzcyk-Hierarchie ein.

Für jedes  $n \in \mathbb{N}$  definieren wir eine Funktion oder Funktionenmenge  $E_n$

$$\begin{aligned} E_0(x, y) &= x + y, \\ E_1(x) &= x^2 + 1 \\ E_{n+2}(0) &= 2 \\ E_{n+2}(x+1) &= E_{n+1}(E_{n+2}(x)). \end{aligned}$$

Dann ist zum Beispiel für  $x \geq 2$ ,  $2^{2^x} \leq E_2(x) \leq 3^{3^x}$ . und

$$2^{2^{\cdot^{\cdot^{\cdot^2}}}} \leq E_3(x) \leq 3^{3^{3^{\cdot^{\cdot^{\cdot^3}}}}}$$

mit Türmen der Höhe  $2x+1$ . Wir definieren  $\mathcal{E}_0$  als den Abschluß der Nullfunktion, der Nachfolgerfunktion und der Projektionen und unter der Komposition und der eingeschränkten primitiven Rekursion. Das heißt, wenn  $g, h, j \in \mathcal{C}$  und  $f$  durch primitive Rekursion durch  $g$  und  $h$  definiert ist und zusätzlich gilt

$$f(x_1, \dots, x_k) \leq j(x_1, \dots, x_k),$$

dann ist  $f \in \mathcal{C}$ .  $\mathcal{E}^{n+1}$  ist analog zu  $\mathcal{E}^0$  definiert, nur dass diesmal  $E_n$  zu den Ausgangsfunktionen hinzugenommen wird. Wir haben zum Beispiel, daß „plus eine Konstante“ in  $\mathcal{E}_0$  ist, daß  $+$  in  $\mathcal{E}_1$  ist, daß die Multiplikation in  $\mathcal{E}_2$  ist, die Exponentiation in  $\mathcal{E}_3$ .

Die vier wichtigsten Eigenschaften der Grzegorzcyk-Hierarchie sind

**SATZ 1.30.** (1) Für  $n \geq 2$  und  $f \in \mathcal{E}^n$  gibt es eine Zahl  $m$ , so daß  $f(x_1, \dots, x_k) \leq E_{n-1}^{(m)}(\max(x_1, \dots, x_k))$ . Hierbei ist  $E_{n-1}^{(m)}$  die  $m$ -fache Iteration von  $E_{n-1}$ .

(2) Wenn  $n \geq 2$  und  $f \in \mathcal{E}^n$  einstellig ist, dann ist  $f$  ab einem endlichen Argument kleiner als  $E_n$ .

(3) Wenn  $g, h \in \mathcal{E}^n$  und  $f$  durch primitive Rekursion aus  $g$  und  $h$  definiert ist, dann ist  $f \in \mathcal{E}^{n+1}$ .

(4)  $\bigcup_n \mathcal{E}^n$  ist die Klasse aller primitiv-rekursiver/ $n$  Funktionen.

Die Beweise dieser Tatsachen können Sie in [7] nachlesen. Wir brauchen nur  $\mathcal{E}^5$ .

$E_{x+1}(x)$  ist ungefähr die Ackermann-Funktion.

Wir werden zeigen, dass  $n \mapsto W(n, c) \in \mathcal{E}^5$ . Wir erklären die Hauptidee des Beweises. Wir beweisen induktiv über  $n$ , daß  $HJ(n, c)$  existiert. Im Induktionsschritt dürfen wir nur die Existenz von  $HJ(n, c)$  benutzen, nicht die Existenz von  $HJ(n, c')$  für größere  $c'$ , denn doppelte Induktionen können zu Ackermann-artigen Schranken führen. Sei  $k$  eine noch unbekannte Zahl. Wir versuchen zu zeigen, daß  $k \geq HJ(n+1, c)$ . Sei also  $d$  eine  $c$ -Färbung von  ${}^k(n+1)$ . Wir versuchen, das Problem auf  $c$ -Färbungen von  ${}^k n$  zu reduzieren. Sei  $\ell = HJ(n, c)$ . Ein natürlicher Ansatz ist, eine  $\ell$ -parametrische Teilmenge  $X$  von  ${}^k(n+1)$  zu finden, so daß zwei Buchstaben nicht unterschieden werden

können durch die Färbung  $d$ . Genauer partitionieren wir  $\{0, 1, \dots, k-1\}$  zuerst in  $\ell$  paarweise disjunkte nicht leere Mengen  $A_0, \dots, A_{\ell-1}$ . Jedes  $A_i$  wird am Ende einen Freiheitsgrad zu  $X$  beitragen, und zwar einen, in dem die Buchstaben  $n-1$  und  $n$  nicht unterschieden werden durch  $d$ . Für jedes  $i < \ell$  werden wir eine nicht leere Teilmenge  $B_i$  von  $A_i$  und eine Funktion  $\eta_i \in {}^{A_i \setminus B_i}(n+1)$  wählen. Dann wird  $X$  die  $\ell$ -parametrische Teilmenge derjenigen  $\eta \in {}^k(n+1)$  sein, so daß

(1 $\eta$ ) für  $s \in A_i \setminus B_i$  ist  $\eta(s) = \eta_i(s)$ . Die bedeutet, daß die angestrebte Gerade auf  $A_i \setminus B_i$  ein Punkt ist.

(2 $\eta$ ) wenn  $s_1$  und  $s_2$  in  $B_i$  sind, dann ist  $\eta(s_1) = \eta(s_2)$ . Die bedeutet, daß die angestrebte Gerade auf  $B_i$  eindimensional wird.

Wir sagen, dass  $n-1$  und  $n$  nicht durch  $d$  unterschieden werden können, wenn für all  $\eta$  und  $\tau \in X$  folgendes gilt.

(U1) Wenn es ein  $i < \ell$  gibt, so daß  $\eta(s) = \tau(s)$  für alle  $s \in k \setminus B_i$  und  $\eta(s) = n-1$  und  $\tau(s) = n$  für  $s \in B_i$ , dann ist  $d(\eta) = d(\tau)$ .

Nun sehen  $k \geq HJ(n+1, c)$  wie folgt ein: Durch wiederholte Anwendung der Ununterscheidbarkeit (U1) von  $\eta$  und  $\tau$  sehen wir

(U2) Wenn  $\eta$  und  $\tau$  in  $X$  und für jedes  $s < k$  gilt: ( $\eta(s) < n-1$  gdw  $\tau(s) < n-1$ ) und (wenn  $\eta(s) < n-1$ , dann  $\eta(s) = \tau(s)$ ), dann  $d(\eta) = d(\tau)$ .

Nun betrachten wir die kanonische Einbettung

$$\pi: {}^\ell(n+1) \rightarrow X \subseteq {}^k(n+1).$$

Wir setzen  $d_1 = d \circ \pi$  und erhalten so eine  $c$ -Färbung von  ${}^\ell(n+1)$ . Wenn  $d_2 = d_1 \upharpoonright {}^\ell n$  ist, dann gibt es nach Induktionsannahme eine  $d_2$ -monochromatische Gerade in  ${}^\ell n$ , sei diese  $L_0 = \{\tau_0, \dots, \tau_{n-1}\}$ . Nun sagt (U2), daß  $\pi[L_0] = \{\pi(\tau_0), \dots, \pi(\tau_{n-1})\}$  erweitert werden kann zu einer  $d$ -monochromatischen Gerade  $L$  in  ${}^k(n+1)$ .

Die Mengen  $A_i$  und  $B_i$  und die Funktionen  $\eta_i \in {}^{A_i \setminus B_i}(n+1)$  werden auf einfache Weise gewählt. Wir setzen  $k = m\ell$  für eine Zahl  $m$  an. Wir werden  $A_i = [mi, m(i+1))$  wählen und dann geeignete  $a_i < b_i < m$  die Mengen  $B_i = [mi + a_i, mi + b_i)$  wählen und zum Schluß  $\eta_i(mi + r) = n$  für  $r < a_i$  und  $\eta_i(mi + 1) = n-1$  für  $b_i \leq r < n$  setzen.  $B_i \neq \emptyset$  ist wichtig, und  $B_i = A_i$  ist nicht ausgeschlossen.

Wie erreichen wir die Bedingung (U1)? Wir möchten den  $i$ -ten Block von  $\eta$  durch den  $i$ -ten Block von  $\tau$  ersetzen, ohne die Farbe durch  $d$  zu ändern. Dies heißt, daß  $a_i$  und  $b_i$  sich ganz ähnlich verhalten über den anderen  $a_j, b_j, j \neq i$ .

Technisch ist hierzu folgendes hinreichend:

DEFINITION 1.31. Für  $\ell, c \in \mathbb{N}$  sei  $f(\ell, c)$  die kleinste natürliche Zahl  $k$  mit der folgenden Eigenschaft:

(\*) Wenn  $\{d_j \mid j < \ell\}$   $c$ -Färbungen von  $^{2\ell-1}k$  sind, dann gibt es zu jedem  $j < \ell$   $a_j < b_j < k$ , so daß für alle  $j < \ell$

$$d_j(a_0, b_0, \dots, a_{j-1}, b_{j-1}, a_j, a_{j+1}, b_{j+1}, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}) = d_j(a_0, b_0, \dots, a_{j-1}, b_{j-1}, b_j, a_{j+1}, b_{j+1}, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}).$$

LEMMA 1.32. (a)  $f(1, c) = c + 1$ .

(b) Für  $\ell \geq 1$  ist  $f(\ell + 1, c) \leq c^{f(\ell, c)^{2^\ell}} + 1$ .  $f \in \mathcal{E}_4$ .

Beweis: (a) ist leicht. (b) Nun sei  $\ell \geq 1$ ,  $m = f(\ell, c)$ ,  $k = c^{m^{2^\ell}} + 1$  und seien  $\{d_j \mid j < \ell + 1\}$   $c$ -Färbungen von  $^{2^{\ell+1}}k$ . Wir definieren

$$d^1: k \rightarrow \{g \mid g: ^{2^\ell}m \rightarrow c\}$$

wie folgt: Für jedes  $a < k$  sei

$$d^1(a)(a_0, b_0, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}) = d_\ell(a_0, b_0, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}, a).$$

Dann gibt es, da  $k$  groß ist,  $a_\ell < b_\ell < k$ , so daß  $d^1(a_\ell) = d^1(b_\ell)$ . Nun definieren wir die  $c$ -Färbungen  $\{d_j^2 \mid j < \ell\}$  von  $^{2^{\ell-1}}m$  durch

$$d_j^2(a_0, b_0, \dots, a_{j-1}, b_{j-1}, a_j, a_{j+1}, b_{j+1}, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}) = d_j(a_0, b_0, \dots, a_{j-1}, b_{j-1}, b_j, a_{j+1}, b_{j+1}, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}, a_\ell, b_\ell).$$

Nach der Definition von  $m$  gibt es  $a_j < b_j < m$  für  $j < \ell$ , so daß (\*) für  $\{d_j^2 \mid j < \ell\}$  gilt. Doch nun erfüllen  $a_j < b_j$  für  $j < \ell + 1$  die Gleichung (\*) auch für  $\{d_j \mid j < \ell + 1\}$ .

Wir haben  $f(x + 1) = h(f(x), x) = c^{f(x)^{2^x}} \in \mathcal{E}_4$ , da  $h(z, x) = c^{z^{2^x}} \in \mathcal{E}_3$ , denn  $h$  wird seinerseits mit primitiver Rekursion mit einer Hilfsfunktion aus  $\mathcal{E}_2$  hergestellt.  $\square$

LEMMA 1.33. (a)  $HJ(1, c) = 1$ .

(b) Für  $n \geq 1$

$$HJ(n + 1, c) \leq HJ(n, c) \times f(HJ(n, c), c^{(n+1)^{HJ(n, c)}}).$$

Da  $f \in \mathcal{E}_4$ , ist  $HJ \in \mathcal{E}_5$ .

Beweis: (a) Trivial. (b) Seien  $\ell = HJ(n, c)$  und  $m = f(\ell, c^{(n+1)^\ell})$  und  $k = \ell m$ .

Sei  $d$  eine  $c$ -Färbung von  $^k(n + 1)$ . Wir definieren  $c$ -Färbungen  $\{d_j^1 \mid j < \ell\}$  auf  $^{2^{\ell-1}}m$  wie folgt. Wenn  $j < \ell$ , dann ist

$$d_j^1(a_0, b_0, \dots, a_{j-1}, b_{j-1}, a_j, a_{j+1}, b_{j+1}, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1})$$

eine Funktion mit Definitionsbereich  $^\ell(n + 1)$  und Bildbereich  $\subseteq \text{rge}(d)$ , so daß jedes  $\eta \in ^\ell(n + 1)$  durch  $d_j^1$  auf  $d(\nu_\eta)$  abgebildet wird mit folgenden Auswahlregeln für  $\nu_\eta$ :

(i) Sei  $i < \ell$ ,  $i \neq j$ ,  $r < m$ ,  $a_i < b_i$ . Dann sei

$$\begin{aligned}\nu_\eta(mi+r) &= n, \text{ falls } r < a_i, \\ &= n-1, \text{ falls } b_i \leq r < m, \\ &= \eta(i), \text{ falls } a_i \leq r < b_i.\end{aligned}$$

(ii) Falls  $i < \ell$ ,  $i \neq j$ ,  $r < m$  und  $a_i \geq b_i$ , dann sei  $\nu_\eta(mi+r) = 0$ . Dieser Fall wird keinen Einfluß haben.

(iii) Sei  $i = j$  und  $r < m$ . Dann ist

$$\begin{aligned}\nu_\eta(mi+r) &= n, \text{ falls } r < a_i, \\ &= n-1, \text{ falls } a_i \leq r < m.\end{aligned}$$

$|\text{rge}(d_j^1)| \leq c^{(n+1)^\ell}$ . Also gibt es  $a_j < b_i < m$  für  $j < \ell$ , die (\*) für  $\{d_j^1 \mid j < \ell\}$  erfüllen. Für jedes  $i < \ell$  sei  $A_i = [mi, m(i+1))$  und  $B_i = [mi + a_i, mi + b_i)$  und  $\eta_i \in {}^{A_i \setminus B_i}(n+1)$  wird durch

$$\begin{aligned}\eta_i(mi+r) &= n, \text{ falls } r < a_i, \\ &= n-1, \text{ falls } b_i \leq r < m.\end{aligned}$$

definiert.

Sei  $X$  die  $\ell$ -parametrische Teilmenge von  ${}^k(n+1)$ , die aus denjenigen  $\eta$  besteht, die die Bedingungen (1 $\eta$ ) und (2 $\eta$ ) erfüllen. Seien  $\eta, \tau \in X$  und gebe es ein  $i < \ell$ , so daß  $\eta(s) = \tau(s)$  für  $s \in k \setminus B_i$  und  $\eta(s) = n-1$  und  $\tau(s) = n$  für  $s \in B_i$ .

Da wir nach Voraussetzung über die  $d_i^1$  wissen, daß

$$\begin{aligned}d_j^1(a_0, b_0, \dots, a_{j-1}, b_{j-1}, a_j, a_{j+1}, b_{j+1}, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}) = \\ d_j^1(a_0, b_0, \dots, a_{j-1}, b_{j-1}, b_j, a_{j+1}, b_{j+1}, \dots, a_{\ell-1}, b_{\ell-1}).\end{aligned}$$

haben wir  $d(\eta) = d(\tau)$ . Also haben wir den Wunsch (U1) erfüllt. Wir haben  $n \mapsto HJ(n, c)$  ist in  $\mathcal{E}^5$ . □<sub>1.28</sub>





## Kleenes Satz von der Normalform

SATZ 2.1. *Der Satz von der Normalform, Kleene 1936. Es gibt eine primitiv-rekursive Funktion  $U$  und für jedes  $n \in \mathbb{N}$  ein primitiv-rekursives Prädikat  $T_n$ , so daß es für jede rekursive Funktion  $f$  in  $n$  Variablen eine Zahl  $e$  (den sogenannten Index von  $f$ , wir schreiben später  $\varphi_e$  statt  $f$ ) gibt, so daß*

1.  $\forall x_0 \dots \forall x_{n-1} \exists y T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y)$ .
2.  $f(x_0, \dots, x_{n-1}) = U(\mu y T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y))$ .

Beweis: Die Idee ist, jeder  $\mu$ -rekursiven Funktion eine Zahl oder Nummer, Index genannt, zuzuordnen (ähnlich wie die Gödelnummern von Formeln) und auch jeder Berechnung eines Wertes eine Zahl zuzuordnen (ähnlich wie Gödelnummern eines Beweises), so daß die Prädikate  $T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y)$  folgendes kodieren:  $y$  ist die Nummer der Berechnung des Wertes der Funktion mit Index  $e$  angesetzt auf den Input  $x, \dots, x_{n-1}$ . Dann wird  $\mu y T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y)$  den kleinsten Code für eine Berechnung ausgeben und  $U$  wird den Output aus  $y$  extrahieren. Dies alles ist einfacher skizziert als durchgeführt. Wir werden jetzt die einzelnen Schritte durchführen.

### 1. Schritt. Die Zuordnung der Indizes

Wie setzen folgende Zuordnung fest (Sie können diese variieren):

- $\langle 0 \rangle$  für die Nullfunktion.
- $\langle 1 \rangle$  für die Nachfolgerfunktion.
- $\langle 2, n, i \rangle$  für die Projektion  $p_i^n$ ,  $0 \leq i < n$ .
- $\langle 3, b_0, \dots, b_{m-1}, a \rangle$  für  $f(\vec{x}) = g(h_0(\vec{x}), \dots, h_{m-1}(\vec{x}))$ , wenn  $b_i$  die Nummer von  $h_i$  ist und  $a$  die Nummer von  $g$  ist.
- $\langle 4, a, b \rangle$  wird  $f(\vec{x}, y)$  zugeordnet, wenn  $f$  die primitive Rekursion aus  $g$  und  $h$  ist und  $a$  die Nummer von  $g$  ist und  $b$  die Nummer von  $h$  ist.
- $\langle 5, a \rangle$  wird  $f(\vec{x}) = \mu y (g(\vec{x}, y) = 0)$  zugeordnet, wenn  $\forall \vec{x} \exists y g(\vec{x}, y) = 0$  und  $a$  die Nummer von  $g$  ist.

Die Nummer oder Zahl, die jeder rekursiven Funktion auf diese Weise zugeordnet wird, heißt der Index  $e$  dieser Funktion. Da es viele Arten gibt, dieselbe Funktion zu definieren, wird jede rekursive Funktion viele verschiedene Indizes haben (wir werden später ein padding Lemma beweisen). Außerdem sind viele Zahlen nicht Indizes einer rekursiven Funktion, entweder, weil sie nicht von der richtigen Form sind, oder, weil ihre Komponenten

ihrerseits nicht Indizes einer rekursiven Funktion sind. Wir werden später sehen, daß die Menge der Indizes (totaler Funktionen) nicht rekursiv ist, denn im allgemeinen kann das Kriterium  $\forall \vec{x} \exists y g(\vec{x}, y) = 0$  nicht von einem Index von  $g$  aus entschieden werden.

2. Schritt Wir schreiben die Berechnungen in Bäume.

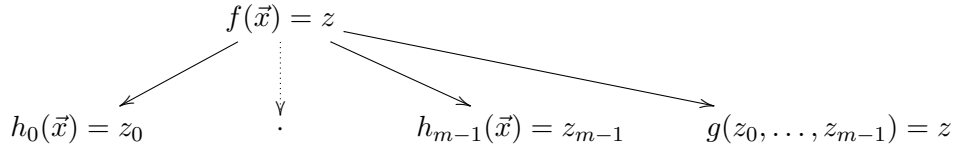
Jeder Knoten in einem Baum gibt Auskunft über einen Induktionsschritt: eine einfachere Funktion, oder dieselbe Funktion mit kleineren Argumenten

- Knoten ohne Vorgänger

$$\begin{aligned}
 f(x) &= 0 && \text{für die Nullfunktion } f = o, \\
 f(x) &= x + 1 && \text{für die Nachfolgerfunktion } f = s, \\
 f(x_0, \dots, x_{n-1}) &= x_i && \text{für die Projektion } f = p_i^n.
 \end{aligned}$$

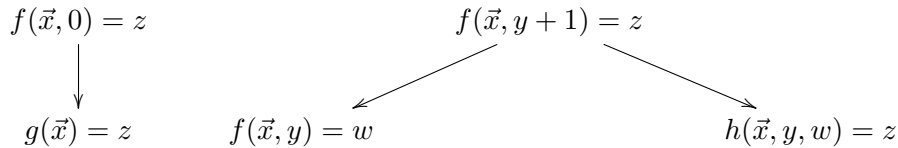
- Komposition

Wenn  $f(\vec{x}) = g(h_0(\vec{x}), \dots, h_{m-1}(\vec{x}))$ , dann hat der Knoten  $f(\vec{x}) = z$  die  $m + 1$  Vorgängerknoten



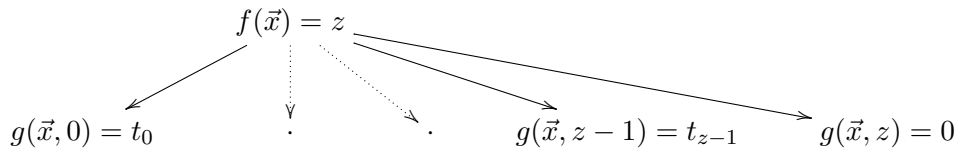
- primitive Rekursion

Wenn  $f(\vec{x}, y)$  durch primitive Rekursion aus  $g$  und  $h$  definiert ist, dann gibt es zwei Möglichkeiten für den Knoten  $f(\vec{x}, y) = z$



- $\mu$ -Rekursion

Wenn  $f(\vec{x}) = \mu y (g(\vec{x}, y) = 0)$ , dann sieht der Baum unterhalb  $f(\vec{x})$  wie folgt aus



und die  $t_i$  sind  $\neq 0$ .

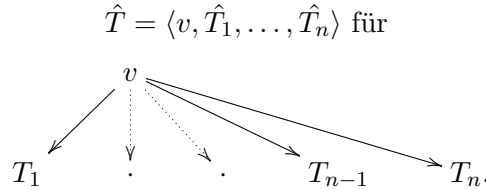
3. Schritt. Kodierungen der Berechnungen.

Der dritte Schritt wird induktiv über die Konstruktion des (endlich großen) Berechnungsbaumes durchgeführt. An jedem Knoten stehe ein Ausdruck der Form  $f(x_0, \dots, x_{n-1}) = z$ . Wir geben diesem Ausdruck die Zahl

$$\langle e, \langle x_0, \dots, x_{n-1} \rangle, z \rangle$$

für einen Index  $e$  von  $f$ . Jeder Knoten wird also durch einen Index, ein Argument und einen Wert repräsentiert, und die Spitze des Baumes hat den Wert  $\langle e, \langle x_0, \dots, x_{n-1} \rangle, z \rangle$ , der für  $f_e(x_0, \dots, x_{n-1}) = z$  steht.

Nun ordnen wir den Bäumen Zahlen zu. Jeder Baum besteht aus einem Vertex  $v$  und einer endlichen (kann auch 0 sein) Zahl von angeordneten Vorgängern, die jeweils einen echten Teilbaum vertreten. Also ist folgende Zuordnung durch Induktion über die Höhe des Baumes definiert:



Wenn ein Vertex  $v$  keine Vorgänger im Baum hat, dann erhält dieser Einpunkt-Baum die Zahl  $\langle v \rangle$ .

4. Schritt. Wir formulieren ein primitiv rekursives Prädikat  $T(y)$ , das aussagt, daß  $y$  einen Berechnungsbaum kodiert.

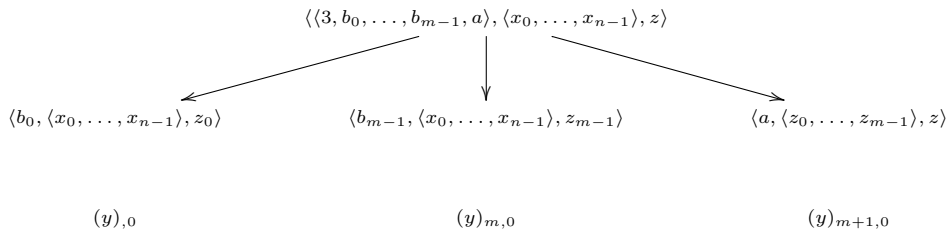
Um die Lesbarkeit zu erhöhen, schreiben wir statt geschachtelter Klammern nur Kommata, also zum Beispiel  $(y)_{1,0} = ((y)_1)_0$ .

- Knoten ohne Vorgänger

$$\begin{aligned} \langle 0, x, 0 \rangle & \text{ für die Nullfunktion } f = o, \\ \langle 1, x, x + 1 \rangle & \text{ für die Nachfolgerfunktion } f = s, \\ \langle \langle 2, n, i \rangle, \langle x_0, \dots, x_{n-1} \rangle, x_i \rangle & \text{ für die Projektion } f = p_i^n. \end{aligned}$$

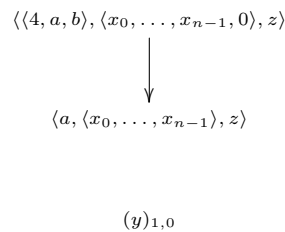
- Komposition

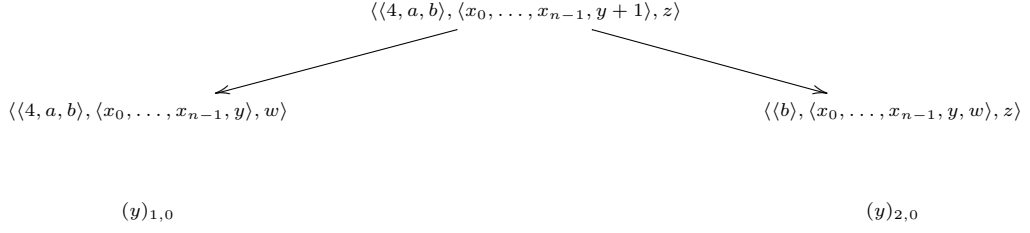
Wenn  $f(\vec{x}) = g(h_0(\vec{x}), \dots, h_{m-1}(\vec{x}))$ , dann hat der Knoten  $f(\vec{x}) = z$  die  $m + 1$  Vorgängerknoten



- primitive Rekursion

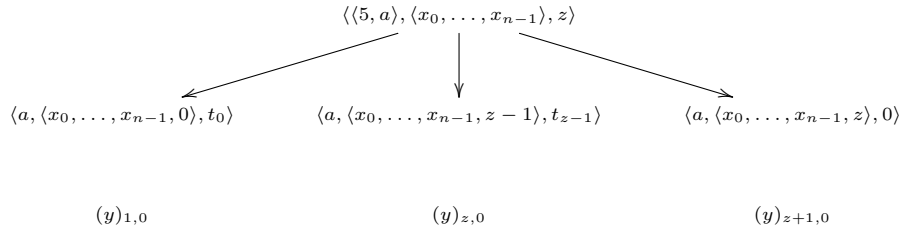
Wenn  $f(\vec{x}, y)$  durch primitive Rekursion aus  $g$  und  $h$  definiert ist, dann gibt es zwei Möglichkeiten für den Knoten  $f(\vec{x}, y) = z$





- $\mu$ -Rekursion

Wenn  $f(\vec{x}) = \mu y (g(\vec{x}, y) = 0)$ , dann sieht der Baum unterhalb  $f(\vec{x})$  wie folgt aus



und die  $t_i$  sind  $\neq 0$ .

Nun können wir das primitiv-rekursive Prädikat „ $y$  ist ein Berechnungsbaum“ formulieren: Die einfachsten Eigenschaften, die auch für Einpunkt bäume gelten, stehen in  $A(y)$ :

$$\begin{aligned}
 A(y) \Leftrightarrow & \text{Seq}(y) \wedge \text{Seq}((y)_0) \wedge \text{lg}((y)_0) = 3 \\
 & \wedge \text{Seq}((y)_{0,0}) \wedge \text{Seq}((y)_{0,1}).
 \end{aligned}$$

Die Ausgangsfunktionen werden beschrieben durch

$$\begin{aligned}
 B(y) \Leftrightarrow & \text{lg}(y) = 1 \wedge \\
 & \{[(y)_{0,0} = \langle 0 \rangle \wedge \text{lg}((y)_{0,1}) = 1 \wedge (y)_{0,2} = 0] \vee \\
 & [(y)_{0,0} = \langle 1 \rangle \wedge \text{lg}((y)_{0,1}) = 1 \wedge (y)_{0,2} = (y)_{0,1} + 1] \vee \\
 & [\text{lg}((y)_{0,0}) = 3 \wedge (y)_{0,0,0} = 2 \wedge (y)_{0,0,1} = \text{lg}((y)_{0,1}) \wedge \\
 & 0 \leq (y)_{0,0,2} \wedge (y)_{0,2} = ((y)_{0,1})_{(y)_{0,0,2}}]\}.
 \end{aligned}$$

Komposition

$$\begin{aligned}
 C(y) \Leftrightarrow & \text{lg}((y)_{0,0}) \geq 3 \wedge (y)_{0,0,0} = 3 \wedge \text{lg}(y) = \text{lg}((y)_{0,0}) \wedge \\
 & (\forall i)_{1 \leq i < \text{lg}(y)-1} [(y)_{i,0,0} = (y)_{0,1,i} \wedge (y)_{i,0,1} = (y)_{0,1,i} \wedge \\
 & (y)_{\text{lg}(y)-1,0,0} = (y)_{0,0,\text{lg}(y)-1} \wedge (y)_{\text{lg}(y)-1,0,2} = (y)_{0,2} \wedge \\
 & (y)_{\text{lg}(y)-1,0,1} = \langle (y)_{1,0,2}, \dots, (y)_{\text{lg}(y)-2,0,2} \rangle.
 \end{aligned}$$

## Primitive Rekursion

$$\begin{aligned}
D(y) \Leftrightarrow & \lg((y)_{0,0}) = 3 \wedge (y)_{0,0,0} = 4 \wedge \\
& \{[(y)_{0,1,\lg((y)_{0,1})-1} = 0 \wedge \lg(y) = 2 \wedge (y)_{1,0,0} = (y)_{0,0,1} \wedge \\
& (y)_{1,0,1} * \langle 0 \rangle = (y)_{0,1} \wedge (y)_{1,0,2} = (y)_{0,2}] \vee \\
& [(y)_{0,1,\lg((y)_{0,1})-1} > 0 \wedge \lg(y) = 3 \wedge (y)_{1,0,0} = (y)_{0,0} \wedge \\
& (y)_{1,0,0} = (y)_{0,0} \wedge \lg((y)_{1,0,1}) = \lg((y)_{0,1}) \wedge \\
& (\forall i)_{0 \leq i < \lg((y)_{0,1})-1} (y)_{1,0,1,i} = (y)_{0,1,i} \wedge \\
& (y)_{1,0,1,\lg((y)_{0,1})-1} + 1 = (y)_{0,1,\lg((y)_{0,1})-1} \wedge \\
& (y)_{2,0,0} = \langle (y)_{0,0,2} \rangle \wedge (y)_{2,0,2} = (y)_{0,2} \wedge \\
& (y)_{2,0,1} = \langle (y)_{1,0,1} \rangle * \langle (y)_{1,0,2} \rangle\}.
\end{aligned}$$

 $\mu$ -Rekursion

$$\begin{aligned}
E(y) \Leftrightarrow & \lg((y)_{0,0}) = 2 \wedge (y)_{0,0,0} = 5 \wedge \\
& \lg(y) \geq 2 \wedge (y)_{0,2} = \lg(y) - 2 \wedge \\
& (\forall i)_{1 \leq i < \lg(y)-1} [(y)_{i,0,0} = (y)_{0,0,1} \wedge \\
& (y)_{i,0,1} = (y)_{0,1} * \langle i-1 \rangle] \wedge \\
& (\forall i)_{1 \leq i < \lg(y)-1} [(y)_{i,0,2} \neq 0] \wedge (y)_{\lg(y)-1,0,2} = 0.
\end{aligned}$$

Nun definieren wir das gesuchte primitiv-rekursive Prädikat  $T$ :

$$\begin{aligned}
T(y) \Leftrightarrow & A(y) \wedge [B(y) \vee C(y) \vee D(y) \vee E(y)] \wedge \\
& [\lg(y) > 0 \rightarrow (\forall i)_{0 \leq i \leq \lg(y)-1} T((y)_i)].
\end{aligned}$$

5. Schritt. Die Definition von  $T_n$  und  $U$ .

$$\begin{aligned}
T_n(e, x_1, \dots, x_n, y) & \Leftrightarrow T(y) \wedge (y)_{0,0} = e \wedge (y)_{0,1} = \langle x_0, \dots, x_{n-1} \rangle \\
U(y) & = (y)_{0,2}
\end{aligned}$$

Diese sind offensichtlich primitiv-rekursiv.

Nun sei  $f$  eine  $n$ -stellige  $\mu$ -rekursive Funktion mit Index  $e$ . Da  $f$  und alle seine Vorgängerfunktionen beim Aufbau von  $e$  total sind, gibt es für jedes Argument  $x_0, \dots, x_{n-1}$  einen Berechnungsbaum für  $f(x_0, \dots, x_{n-1})$ , der die durch  $e$  angegebene Tiefe und Gestalt hat.

Jeder Berechnungsbaum, insbesondere der mit der kleinsten Kodenummer  $y$ , gibt den Wert  $f(x_1, \dots, x_n)$  als dritte Komponente an seiner Spitze  $v$ . Daher ist

$$f(x_0, \dots, x_{n-1}) = U(\mu y T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y)).$$

□



## Partielle rekursive Funktionen

### 1. Padding, rekursive Aufzählungen und der s-m-n-Satz

Wir verwenden kleine griechische Buchstaben für partielle Funktionen, also  $\varphi: \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$ . Wir schreiben  $\varphi(\vec{x}) \downarrow$  gdw  $\vec{x} \in \text{dom}(\varphi)$ , und  $\varphi(\vec{x}) \uparrow$  im gegenteiligen Fall. Zwei partielle Funktionen sind gleich, in Zeichen  $\varphi \simeq \psi$  gdw  $\text{dom}(\varphi) = \text{dom}(\psi)$  und für alle  $\vec{x} \in \text{dom}(\varphi)$ ,  $\varphi(\vec{x}) = \psi(\vec{x})$ . Analog benutzen wir  $\varphi(\vec{x}) \simeq \psi(\vec{x})$  für ein  $\vec{x}$ . (Dagegen kann für  $\varphi(\vec{x}) \simeq z$  immer  $\varphi(\vec{x}) = z$  geschrieben werden, da  $z$  immer definiert ist.) Die Inklusion  $\varphi \subseteq \psi$  ist die Inklusion der Graphen.

DEFINITION 3.1. Kleene 1936. Die Menge der partiellen rekursiven Funktion ist die kleinste Menge von Funktionen, die

- (1) die Ausgangsfunktionen  $o(x) = 0$ ,  $S(x) = x + 1$ ,  $p_i^n(\vec{x}) = x_i$  enthält und
- (2) unter Verkettung, primitiver Rekursion und unter unbeschränkter  $\mu$ -Rekursion abgeschlossen ist. Unbeschränkte  $\mu$ -Rekursion bedeutet: Die Bedingung  $\forall \vec{x} \exists y \psi(\vec{x}, y) = 0$  wird fallengelassen und stattdessen setzt man

$$\varphi(\vec{x}) \simeq \mu y [\forall z \leq y \psi(\vec{x}, z) \downarrow \wedge \psi(\vec{x}, y) = 0].$$

(Die heißt nach unseren Konventionen:  $\varphi(\vec{x})$  ist nicht definiert, wenn es kein solches  $y$  gibt.)

ÜBUNG 3.2. Wenn man in der unbeschränkten  $\mu$ -Rekursion die Bedingung

$$\forall z \leq y \psi(\vec{x}, z) \downarrow$$

fallenlässt, dann erhält man eine echt größere Klasse von Funktionen. Nehmen Sie für  $A \subseteq \mathbb{N}$  zum Beispiel das Halteproblem 3.25, das ist eine rekursiv aufzählbare, nicht rekursive Menge. Dann setzen wir

$$\psi(x, y) = 0 \leftrightarrow (y = 0 \wedge x \in A) \vee y = 1.$$

Dann ist  $\psi$  partiell rekursiv, aber die Funktion

$$f(x) \simeq \mu y (\psi(x, y) \simeq 0)$$

ist nicht partiell rekursiv, denn wir haben  $f(x) = 0$  gdw  $x \in A$ , und  $A$  war ja gerade nicht rekursiv.

**SATZ 3.3.** *Der Satz von der Normalform für partielle rekursive Funktionen, Kleene 1938. Es gibt eine primitiv-rekursive Funktion  $U$  und für jedes  $n \in \mathbb{N}$  ein primitiv-rekursives Prädikat  $T_n$ , so daß es genau für jede partielle rekursive Funktion  $\varphi$  in  $n$  Variablen einen Index  $e$  gibt, so daß*

1.  $\forall \vec{x}(\varphi(\vec{x}) \downarrow \leftrightarrow \exists y T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y))$ .
2.  $\varphi(x_0, \dots, x_{n-1}) \simeq U(\mu y T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y))$ .

**Beweis:** Der Beweis geht analog zum Beweis des Normalformentheorems für totale rekursive Funktionen. Der Index  $\langle 5, a \rangle$  wird dem Aufbauschritt

$$\varphi(\vec{x}) \simeq \mu y [\forall z \leq y \psi(\vec{x}, z) \downarrow \wedge \psi(\vec{x}, y) = 0]$$

zugeordnet, wenn  $a$  der Index von  $\psi$  ist. Der Berechnungsbaum greift nur auf die Werte  $\psi(\vec{x}, z)$  für  $z \leq y$  zurück.  $\square$

**KOROLLAR 3.4.** *Die rekursiven Funktionen sind genau die partiellen rekursiven Funktionen, die zufällig total sind.*

**Beweis.** Natürlich ist jede rekursive Funktion partiell rekursiv und total. Sei nun  $\varphi$  eine partielle rekursive Funktion. Dann gibt es ein  $e$ , so daß  $\varphi(x_0, \dots, x_{n-1}) \simeq U(\mu y T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y))$ . Wenn  $\varphi$  nun total ist, dann gilt  $\forall \vec{x} \varphi(\vec{x}) \downarrow$ . Also gibt es nach obiger  $\simeq$ -Gleichung zu jedem  $\vec{x}$  ein  $y$ , so daß  $T_n(e, x_0, \dots, x_{n-1}, y)$ . Dann ist  $\varphi$  nach dem Normalformtheorem für totale Funktionen rekursiv.  $\square$

Das Normalformtheorem für partielle Funktionen hat nun den Vorteil, daß die Menge der Indizes für partielle Funktionen rekursiv ist.

**ÜBUNG 3.5.** *Beweisen Sie diese letzte Behauptung.*

Die folgende Definition ist von zentraler Bedeutung:

**DEFINITION 3.6.** Seien  $e, n, s \in \mathbb{N}$ . Unter  $s$  kann man sich stage oder Schrittzahl vorstellen.

1.  $\varphi_e^n$  oder  $\{e\}^n$  ist die  $e$ -te partielle rekursive  $n$ -stellige Funktion:

$$\varphi_e^n(\vec{x}) \simeq \{e\}^n(\vec{x}) \simeq U(\mu y (T_n(e, \vec{x}, y))).$$

2.  $\varphi_{e,s}^n$  oder  $\{e\}_s^n$  ist die Approximation bis zum Berechnungsbaum der Größe  $s$  für die  $e$ -te partielle rekursive  $n$ -stellige Funktion:

$$\varphi_{e,s}^n(\vec{x}) \simeq \{e\}_s^n(\vec{x}) \simeq U(\mu y ((T_n(e, \vec{x}, y)) \wedge y < s)).$$

Wir haben also:

$$\varphi_{e,s}^n(\vec{x}) \simeq \{e\}_s^n(\vec{x}) \simeq \begin{cases} \varphi_e^n(\vec{x}) & \text{wenn } (\exists y < s) T_n(e, \vec{x}, y) \\ \text{undefiniert} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Der folgende symmetrische Satz ist sogar älter als Kleenes Satz von 1936. Posts Arbeit aus den 1920er Jahren wurde von Post selbst unterschätzt (nach seinen Aussagen hatte er zu wenig Vertrauen in die universelle Bedeutung



seines Berechenbarkeitsbegriffs, also in das, was ab Ende der 1930er Jahre dann als Churchsche These bekannt wurde) und nicht zur Veröffentlichung eingereicht.

**SATZ 3.7.** *Der Aufzählungssatz (Post 1922, Turing 1936, Kleene 1938)*  
Die Folge  $\langle \varphi_e^n \mid e \in \mathbb{N} \rangle$  ist eine partielle rekursive Aufzählung aller  $n$ -stelligen partiellen rekursiven Funktionen im folgenden Sinne:

1. Für jedes  $e$  ist  $\varphi_e^n$  eine partielle rekursive Funktion in  $n$  Variablen,
2. Wenn  $\psi$  eine partielle rekursive  $n$ -stellige Funktion ist, dann gibt es ein  $e$ , so daß  $\psi \simeq \varphi_e^n$ ,
3. Es gibt eine partielle rekursive Funktion in  $n + 1$  Variablen, so daß

$$\varphi(e, \vec{x}) \simeq \varphi_e^n(\vec{x}).$$

Beweis: Alles folgt aus dem Normalformtheorem. Für den dritten Teil setzen wir

$$\varphi(e, \vec{x}) \simeq U(\mu y T_n(e, \vec{x}, y)).$$

□

**PROPOSITION 3.8.** *Das Padding Lemma.* Ausgehend von einem Index  $e$  einer partiellen rekursiven Funktion kann man auf berechenbare Weise unendlich viele weitere Indizes derselben Funktion herstellen.

Beweis: Sei  $m(e, k)$  der Index von  $U(\mu y (T_n(e, \vec{x}, y) \wedge \bigwedge_{i < k} x_i = x_0))$ . Dann berechnen alle  $\varphi_{m(e, k)}$  dasselbe  $\varphi_e$  und es ist  $m(e, k) \neq m(e, \ell)$  für  $\ell \neq k$ . □

**SATZ 3.9.** *Das s-m-n- oder  $S_n^m$ -Theorem.* Kleene 1938. Für jedes Paar  $(n, m)$  von Stelligkeiten es eine primitiv-rekursive injektive Funktion

$$S_n^m(e, x_0, \dots, x_{n-1}),$$

so daß

$$\varphi_{S_n^m(e, x_0, \dots, x_{n-1})}(y_0, \dots, y_{m-1}) \simeq \varphi_e(x_0, \dots, x_{n-1}, y_0, \dots, y_{m-1}).$$

Beweis: Die gesuchte Funktion  $S_n^m$  berechnet den Index der Funktion

$$(x_0, \dots, x_{n-1}) \mapsto \varphi_e(C_{x_0}, \dots, C_{x_{n-1}}, y_0, \dots, y_{m-1})$$

aus  $e$  und  $x_0, \dots, x_{n-1}$ .  $C_x(z) = S^{(x)}(0)$  ist die konstante Funktion  $x$ . Der Aufbau von  $S_n^m(e, \vec{x})$  geht induktiv (diese Induktion ist selbst eine primitive Rekursion) über den Aufbau von  $e$ . Bei den Schritten  $e = \langle 1 \rangle$  oder  $\langle 2, n, i \rangle$  kommen unter Umständen die  $x_i$  hinein, zum Beispiel  $e = \langle 2, n + m, i \rangle$  und  $i < n$ . Dann ist

$\varphi_e((x_0, \dots, x_{n-1}, y_0, \dots, y_{m-1}) = x_i = S^{(x_i)}(0)$  und hat den Index

$$S_n^m(e, x_0, \dots, x_{n-1}) = \langle 3, e', \langle 1 \rangle \rangle$$

und  $e'$  ist der Index von  $S^{(x_i)}(0)$ . Der Index von  $S^{(0)}(0)$  ist  $\langle 0 \rangle$ . (Der Exponent in Klammern gibt die Zahl der Iterationen an.) Bei den weiteren Aufbausritten zieht sich die Berechnung induktiv hoch, zum Beispiel

$$S_n^m(\langle 5, a \rangle, x_0, \dots, x_{n-1}) = \langle 5, S_n^m(a, x_0, \dots, x_{n-1}) \rangle.$$

Die Hauptarbeit des Einsetzens von Konstanten  $C_{x_i}$  für die Variablen  $x_i$  geschieht also an den Blättern des Berechnungsbaumes für  $\varphi_e(\vec{x}, \vec{y})$ .  $\square$

## 2. Rekursiv aufzählbare Mengen

DEFINITION 3.10. Post 1922, Kleene 1936. Eine  $n$ -stellige Relation heißt rekursiv aufzählbar (r.e.), wenn sie der Definitionsbereich einer  $n$ -stelligen partiellen rekursiven Funktion ist. Wir schreiben  $W_e^n = \text{dom}(\varphi_e^n)$  und  $W_{e,s}^n = \text{dom}(\varphi_{e,s}^n)$ .

SATZ 3.11. *Das Normalformtheorem für r.e. Relationen. Kleene 1936, Rosser 1936, Mostowski 1947. Jede  $n$ -stellige Relation  $P$  ist r.e., gdw es eine  $n+1$ -stellige rekursive Relation  $R$  gibt, so daß*

$$P(\vec{x}) \leftrightarrow \exists y R(\vec{x}, y),$$

gdw es einen Index  $e$  von  $P$  gibt, so daß

$$P(\vec{x}) \leftrightarrow W_e^n(\vec{x}) \leftrightarrow \exists y R(\vec{x}, y).$$

Beweis: Wenn  $P$  r.e. ist, dann gibt es ein  $e$ , so daß  $P = \text{dom}(\varphi_e)$ , also  $W_e(\vec{x}) \leftrightarrow \varphi_e(\vec{x}) \downarrow \leftrightarrow \exists y T_n(e, \vec{x}, y)$ . Für die umgekehrte Inklusion haben wir: Wenn  $P(\vec{x}) \leftrightarrow \exists y R(\vec{x}, y)$  mit einem rekursiven  $R$  ist, dann ist  $P$  der Definitionsbereich der partiellen rekursiven Funktion  $\varphi(\vec{x}) \simeq \mu y R(\vec{x}, y)$ .  $\square$

Seien  $p$  und  $q$  Polynome über  $\mathbb{Z}$ .

$$D = \{y \in \mathbb{N} \mid \exists \vec{x} \in \mathbb{N}^k p(\vec{x}, y) = q(\vec{x}, y)\}.$$

Jedes solche  $D$  ist rekursiv aufzählbar, da die Polynome rekursiv sind. Matyasevich [4] bewies die erstaunliche Umkehrung: Zu jeder r.e. Menge  $S$  gibt es Polynome  $p, q$ , so daß die Menge der positiven Lösungen  $D$  der diophantischen Gleichung gleich  $S$  ist. Da es rekursiv aufzählbare, nicht rekursive Mengen gibt, löst dieses Ergebnis Hilberts zehntes Problem negativ: Es gibt eine diophantische Menge  $D$ , die nicht entscheidbar (= rekursiv) ist.

PROPOSITION 3.12. *Das Graphentheorem. Sei  $\varphi$  partiell,  $f$  total. Dann ist  $\varphi$  eine partielle rekursive Funktion gdw sein Graph r.e. ist.  $f$  ist rekursiv gdw sein Graph rekursiv ist.*

Beweis: Der Graph einer Funktion  $\varphi$  ist definiert durch

$$G = \{(\vec{x}, y) \mid \varphi(\vec{x}) = y\}.$$

Wenn  $\varphi$  eine partielle rekursive Funktion ist, dann ist  $\varphi \simeq \varphi_e$  für einen Index  $e$  und daher

$$\begin{aligned} G_\varphi &= \{(\vec{x}, z) \mid \varphi_e(\vec{x}) = z\} \\ &= \{(\vec{x}, z) \mid U(\mu y T_n(e, \vec{x}, y)) = z\} \\ &= \{(\vec{x}, z) \mid \exists y (T_n(e, \vec{x}, y) \wedge (\forall t < y) \neg T_n(e, \vec{x}, t)) \wedge U(y) = z\} \end{aligned}$$

Also ist  $G_\varphi$  nach dem Aufzählungstheorem eine r.e. Menge.

Wenn umgekehrt  $G_\varphi$  r.e. ist, dann gibt es eine rekursive Relation  $R$ , so daß

$$(\vec{x}, z) \in G_\varphi \leftrightarrow \exists y R(\vec{x}, z, y).$$

Indem man  $z$  und  $y$  in eine Zahl  $t = \langle z, y \rangle$  kodiert, erhält man

$$\varphi(\vec{x}) \simeq (\mu t R(\vec{x}, (t)_0, (t)_1))_0.$$

Der Algorithmus sucht also die  $z$  mit  $G(\vec{x}, z)$  aber nicht den  $z$  entlang, sondern den  $t$  entlang, denn er darf ja nicht bei einem vergeblichen  $z$  stecken bleiben.

Der Teil des Satzes für die totalen Funktionen ist einfacher: Wenn  $f$  rekursiv ist, dann ist die charakteristische Funktion von  $G_f$  rekursiv:

$$\chi_{G_f}(\vec{x}, z) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } f(\vec{x}) = z, \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Sei umgekehrt  $G_f$  rekursiv. Dann ist  $f(\vec{x}) = \mu z G_f(\vec{x}, z)$  und die Voraussetzung, daß  $f$  total ist, heißt  $\forall \vec{x} \exists y (\vec{x}, y) \in G_f$ . Also ist der  $\mu$ -Rekursionsschritt wohldefiniert.  $\square$

Unter einer Uniformisierung einer Relation  $R(\vec{x}, y)$  versteht man eine partielle Funktion  $\varphi$ , so daß

$$(\forall \vec{x}) (\exists y R(\vec{x}, y) \leftrightarrow (\varphi(\vec{x}) \downarrow \wedge R(\vec{x}, \varphi(\vec{x}))).$$

Zum Beispiel kann man fragen, ob jede Borel-Relation auf  $\mathbb{R}$  eine Borel-Uniformisierung hat (nein) und ob jede analytische Relation eine analytische Uniformisierung hat (ja, Satz von Kôndo, [1]).

**PROPOSITION 3.13.** *Die Uniformisierungseigenschaft. Kleene 1936. Wenn  $P$  r.e. ist, dann gibt es eine partielle rekursive Funktion  $\varphi$ , so daß*

$$\exists y P(\vec{x}, y) \rightarrow (\varphi(\vec{x}) \downarrow \wedge P(\vec{x}, \varphi(\vec{x}))).$$

*Wenn  $P$  r.e. ist und  $\forall \vec{x} \exists y P(\vec{x}, y)$ , dann gibt es eine rekursive Funktion  $f$  so daß*

$$\forall \vec{x} P(\vec{x}, f(\vec{x})).$$

**Beweis:** Wenn  $P$  r.e. ist, dann gibt es eine rekursive Relation  $R$ , so daß

$$P(\vec{x}, y) \leftrightarrow \exists z R(\vec{x}, y, z).$$

Indem man wieder  $y$  und  $z$  in eine Zahl  $t = \langle y, z \rangle$  kodiert, erhält man

$$\varphi(\vec{x}) \simeq (\mu t R(\vec{x}, (t)_0, (t)_1))_0.$$

Der Algorithmus sucht also die  $y$ , so daß  $P(\vec{x}, y)$  nachgewiesen wird, und dies ist nicht notwendigerweise das kleinste  $y$ , da gleichzeitig auch den  $z$  entlang gesucht wird.  $\square$

SATZ 3.14. *Eine Charakterisierung der r.e. Mengen. Kleene 1936. Äquivalent sind*

1.  $A$  is r.e.
2.  $A$  ist das Bild einer partiellen rekursiven Funktion  $\varphi$ .
3.  $A = \emptyset$  oder  $A$  ist das Bild einer rekursiven Funktion  $f$ .

Beweis: Dies geht in einer Runde.  $1 \Rightarrow 2$ : Sei  $A = W_e$ . Wir setzen  $\varphi(x) \simeq x + 0 \cdot \varphi_e(x)$ . Dann ist das Bild von  $\varphi$  gerade  $\text{dom}(\varphi_e)$ , und  $\varphi$  ist partiell rekursiv.

$2 \Rightarrow 3$ : Set  $A$  nicht leer und sei  $A = \text{rge}(\varphi_e)$ . Wir wählen ein  $a \in A$ . Wir betrachten den Ansatz

$$f(x) = \begin{cases} z, & \text{wenn } \varphi_e(x) \downarrow \wedge \varphi_e(x) = z, \\ a, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Doch dieses  $f$  ist womöglich nicht rekursiv, da wir  $\varphi_e(x) \downarrow$  vielleicht nicht entscheiden können. Daher ändern wir den Aufzählungsmodus und bauen die Schrittzahl als zweites Argument ein. Sie  $I: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  rekursiv und bijektiv. Dann setzen wir

$$f(I(x, s)) = \begin{cases} z, & \text{wenn } \varphi_{e,s}(x) \downarrow \wedge \varphi_{e,s}(x) = z \\ a & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dann ist  $f$  total, da  $I$  surjektiv ist. Außerdem ist von  $z = I(x, s)$  aus  $x$  und  $s$  berechenbar. Somit ist  $f$  rekursiv.

$2 \Rightarrow 1$ : Wenn  $A$  leer ist, dann ist  $A$  der Definitionsbereich der überall undefinierten Funktion. Wenn  $A$  nicht leer ist, dann setzen wir  $\varphi(x) \simeq \mu z f(z) = x$ . Dann ist  $\varphi(x) \downarrow \leftrightarrow x \in \text{rge}(f)$ , wie gewünscht.  $\square$

SATZ 3.15. *Eine Charakterisierung der rekursiven Mengen. Kleene 1936. Äquivalent sind*

1.  $A$  is rekursiv.
2.  $A$  ist das Bild einer rekursiven monoton wachsenden Funktion  $f$ .

Beweis: Sei  $A$  rekursiv und nicht leer und sei  $a = \min(A)$ . Wir setzen

$$\begin{aligned} f(0) &= a, \\ f(n+1) &= \begin{cases} n+1, & \text{wenn } n+1 \in A, \\ f(n), & \text{sonst.} \end{cases} \end{aligned}$$

Nun von 2 nach 1: Wenn  $A$  endlich ist, dann ist  $A$  rekursiv. Sei nun  $A$  unendlich und das Bild einer monoton wachsenden rekursiven Funktion  $f$ .

$$z \in A \leftrightarrow z \in \{f(0), \dots, f(\mu x (f(x) > z))\},$$

und die rechte Seite ist rekursiv.  $\square$

**SATZ 3.16.** *Post 1943, Kleene 1943, Mostowski 1947. Jede Menge  $A$  ist rekursiv genau dann, wenn  $A$  und  $\bar{A} = \mathbb{N} \setminus A$  beide r.e. sind.*

**Beweis:** Sei  $A$  rekursiv mit charakteristischer Funktion  $c_A$ . Dann ist  $A = \text{dom}(\varphi)$  und  $\bar{A} = \text{dom}(\psi)$  für

$$\begin{aligned} \varphi(x) &\simeq \begin{cases} 1, & \text{wenn } c_A(x) = 1, \\ \uparrow, & \text{sonst.} \end{cases}, \\ \psi(x) &\simeq \begin{cases} 0, & \text{wenn } c_A(x) = 0, \\ \uparrow, & \text{sonst.} \end{cases} \end{aligned}$$

Nun seien für die umgekehrte Richtung  $A$  und  $\bar{A}$  beide r.e. und nicht leer. Es gibt rekursive Aufzählungen  $f, g, A = \text{rge}(f), \bar{A} = \text{rge}(g)$ . Dann sind die beiden Aufzählungen disjunkt und sie decken zusammen ganz  $\mathbb{N}$  ab. Um  $n \in A$  zu entscheiden, lassen wir beide Aufzählungen abwechselnd laufen, bis wir zu einem  $x$  gelangen, so daß  $n = f(x)$  oder  $n = g(x)$ . Im ersten Fall ist  $n \in A$ , im zweiten Fall ist  $n \in \bar{A}$ .  $\square$

**SATZ 3.17.** *Post 1944 Jede unendliche r.e. Menge hat eine unendliche rekursive Teilmenge.*

**Beweis:** Sei  $A$  unendlich, und sei  $A = \text{rge}(F)$  für eine rekursive Funktion  $f$ . Dann definieren wir  $g$  durch primitive Rekursion aus  $f$ :

$$\begin{aligned} g(0) &= f(0), \\ g(n+1) &= f(\mu y (f(y) > g(n))). \end{aligned}$$

Nach dem Satz über die monoton aufsteigende Aufzählung ist das Bild von  $g$  rekursiv. Außerdem ist  $\text{rge}(g) \subseteq \text{rge}(f) = A$ .  $\square$

**SATZ 3.18.** *Post 1943, Mostowski 1947. Der Verband der r.e. Mengen.*

1. Die Menge aller r.e. Menge zusammen mit der Relation  $\subseteq$  ist ein distributiver Verband mit einem kleinsten und einem größten Element. Die rekursiven Mengen sind genau die Mengen, die ein Komplement haben.
2. Die Bilder und die Urbilder r.e. Mengen unter partiellen rekursiven Funktionen sind wieder r.e.

**Beweis:** 1. Das kleinste und das größte Element sind  $\emptyset$  und  $\mathbb{N}$ . Die Aussage über die Komplemente folgt aus 3.16. Um zu zeigen, daß mit  $A$  und  $B$  auch  $A \cap B$  und  $A \cup B$  rekursiv aufzählbar sind, lassen wir  $A = \text{rge}(f)$  und  $B = \text{rge}(g)$  abwechselnd ein Element aufzählen. Falls  $x$  in  $\{g(0), \dots, g(n)\} \cap \{f(0), \dots, f(n)\}$  vorkommt, zählen wir  $x$  in  $A \cap B$  auf, dasselbe für  $\cup$ .

2. Sei  $A$  r.e., und sei  $\varphi$  eine partielle rekursive Funktion.  $\varphi(A)$  besteht aus allen Elementen  $\varphi(x)$  für  $x \in A$ . Um  $\varphi(A)$  rekursiv aufzuzählen, genügt es,  $A$  aufzuzählen und in die Aufzählung eingewoben werden immer mehr Schritte an  $\varphi(x)$  zu rechnen.

Ähnlich wird  $\varphi^{-1}(A)$  aufgezählt: immer größere Stücke von  $A$  werden aufgezählt und immer mehr Schritte wird  $\varphi(x)$  gleichzeitig an immer mehr Argumenten  $x$  berechnet. Falls ein  $x$  gefunden wird, so daß  $\varphi(x) \downarrow$  und  $\varphi(x) \in A$ , dann wird es in  $\varphi^{-1}(A)$  aufgenommen.  $\square$

**SATZ 3.19.** *Post 1943, Mostowski 1947 Die Boolesche Algebra der rekursiven Mengen.*

1. Die Menge aller rekursiven Menge zusammen mit der Relation  $\subseteq$  ist eine Boolesche Algebra.
2. Die Urbilder rekursiver Mengen unter rekursiven Funktionen sind wieder rekursiv.

**Beweis:** Nur der Teil über die Urbilder ist neu. Da  $f^{-1}(\bar{A}) = \overline{f^{-1}(A)}$ , sind sowohl  $f^{-1}$  als auch  $\overline{f^{-1}(A)}$  rekursiv aufzählbar, und damit ist nach 3.16  $f^{-1}(A)$  rekursiv.  $\square$

**PROPOSITION 3.20.** *Die Reduktionseigenschaft. Rosser 1936, Kleene 1950. Zu je zwei r.e. Mengen  $A$  und  $B$  gibt es r.e. Teilmengen  $A' \subseteq A$ ,  $B' \subseteq B$ , so daß*

$$A' \cap B' = \emptyset \text{ und } A' \cup B' = A \cup B.$$

**Beweis:** Für die  $x \in A \cap B$  wird beschlossen: wenn  $x$  in  $A$  früher vorkommt als in  $B$ , so nehmen wir  $x \in A'$ , andernfalls in  $B'$ . Sei  $x \in A \leftrightarrow \exists y R(x, y)$  und  $x \in B \leftrightarrow \exists y Q(x, y)$  mit rekursiven  $R, Q$ .

$$x \in A' \leftrightarrow \exists y [R(x, y) \wedge \forall z \leq y \neg Q(x, z)]$$

$$x \in B' \leftrightarrow \exists y [Q(x, y) \wedge \forall z < y \neg R(x, z)]$$

$\square$

### 3. Diagonalisierung

**PROPOSITION 3.21.** *Eine rekursive Version von Cantors Satz. Kleene 1936, Turing 1936. Es gibt keine rekursive Funktion, die mindestens einen Index jeder rekursiven 0,1-wertigen Funktion aufzählt.*

**Beweis.** Sei  $f$  rekursiv, so daß  $\varphi_{f(x)}$  total und ist für jedes  $x$ . Wir zeigen, dass eine Funktion nicht in der Aufzählung vorkommt, nämlich die Funktion

$$g(x) = 1 - \varphi_{f(x)}(x).$$

$g$  hat höchstens 0 und 1 als Werte und  $g$  ist partiell rekursiv nach dem Aufzählungstheorem, und  $g$  ist total nach der Voraussetzung über  $f$ . Aber  $g(x) \neq \varphi_{f(x)}(x)$ , also ist  $g \neq \varphi_{f(x)}$  für jedes  $x$ , also kommt kein Index von  $g$  in der Aufzählung durch  $f$  vor.  $\square$

Wir zeigten gerade, daß

$$\text{Tot} = \{x \mid \varphi_x \text{ ist total}\}$$

nicht r.e. ist. Insbesondere ist Tot nicht rekursiv, es gibt also keinen Algorithmus, der entscheidet, ob ein Index ein Index einer totalen Funktion ist.

**SATZ 3.22.** *Der Kern aller Unentscheidbarkeitsresultate. Post 1922, Gödel 1931, Kleene 1936. Es gibt eine nicht rekursive, r.e. Menge. Die Menge*

$$K = \{x \mid \varphi_x(x) \downarrow\}$$

*ist ein Beispiel.*

Beweis: Nach dem Aufzählungssatz gibt es eine partielle rekursive Funktion  $\varphi$ , so daß

$$\varphi(x) \simeq \varphi_x(x).$$

Dann ist  $K$  r.e., da  $K = \text{dom}(\varphi)$ . Wir zeigen auf zwei verschiedene Arten, daß  $K$  nicht rekursiv ist.

1. Art: Wenn  $K$  rekursiv wäre, so wäre auch die Funktion ( $\varphi(x) = 0$  wenn  $x \in \bar{K}$  und undefiniert sonst) partiell rekursiv. Dann wäre  $\varphi \simeq \varphi_e$  für einen Index  $e$ . Aber dann ist  $\varphi_e(e) \downarrow \leftrightarrow e \notin \bar{K}$ , im Widerspruch zur Definition von  $K$ .

2. Art: Wenn  $K$  rekursiv wäre, dann wäre  $\bar{K}$  r.e. Aber dann ist  $x \in \bar{K} \leftrightarrow x \notin W_x$ , also unterscheidet sich  $\bar{K}$  von der  $x$ -ten r.e. Menge im Element  $x$ , für alle  $x$ , und daher ist  $\bar{K}$  nicht r.e.  $\square$

**DEFINITION 3.23.** Kleene 1950, Trakhtenbrot 1953. Zwei disjunkte Mengen  $A$  und  $B$  heißen rekursiv trennbar wenn es eine rekursive Menge  $C$  gibt, so daß  $A \subseteq C$  und  $B \subseteq \bar{C}$ . Im gegenteiligen Falle heißen  $A$  und  $B$  nicht rekursiv trennbar oder „rekursiv untrennbar“ (eine direkte Übersetzung von recursively inseparable, meinem Sprachgefühl nach ist dieses unmögliches Deutsch).

**SATZ 3.24.** *Rosser 1936, Kleene 1950, Novikov, Trakhtenbrot 1953 Es gibt zwei disjunkte nicht rekursiv trennbare r.e. Mengen.*

Beweis: Wir nehmen

$$A = \{x \mid \varphi_x(x) = 0\}$$

und

$$B = \{x \mid \varphi_x(x) = 1\}.$$

Falls es eine rekursive trennende Menge  $C$  gäbe, dann wäre die charakteristische Funktion  $c_C$  von  $C$  rekursiv und hätte einen Index  $e$ . Dann wäre

$$\begin{aligned}\varphi_e(e) \simeq 0 &\rightarrow e \in A \rightarrow e \in C \rightarrow \varphi_e(e) = c_C(e) = 1, \\ \varphi_e(e) \simeq 1 &\rightarrow e \in B \rightarrow e \in \bar{C} \rightarrow \varphi_e(e) = c_C(e) = 0.\end{aligned}$$

□

**SATZ 3.25.** *Die Unentscheidbarkeit des Halteproblems. Turing 1936. Die Menge*

$$K_0 = \{\langle x, e \rangle \mid x \in W_e\}$$

*ist r.e. und nicht rekursiv. Die Menge  $K_0$  wird das Halteproblem genannt.*

**Beweis:**  $K_0$  ist r.e. nach dem Aufzählungstheorem. Wenn  $K_0$  rekursiv wäre, so auch  $K$ , da

$$x \in K \leftrightarrow \langle x, x \rangle \in K_0.$$

□

Die Unentscheidbarkeit des Halteproblems ist nur die Spitze eines Eisbergs aus unentscheidbaren Mengen.

**DEFINITION 3.26.** Eine Menge  $A$  heißt Indexmenge, wenn es eine Menge  $\mathcal{A}$  partieller rekursiver Funktionen gibt, so daß  $A$  die Indexmenge von  $\mathcal{A}$  ist, das heißt:

$$A = \{x \mid \varphi_x \in \mathcal{A}\}.$$

Wenn  $A$  die Indexmenge von  $\mathcal{A}$  ist, dann schreiben wir  $A = \theta\mathcal{A}$ .

**DEFINITION 3.27.** Decker, Rice 1953. Eine Menge partieller rekursiver Funktionen heißt vollständig rekursiv, wenn ihre Indexmenge rekursiv ist.

**SATZ 3.28.** *Rice 1953. Jede Menge partieller rekursiver Funktionen  $\mathcal{A}$  ist vollständig rekursiv gdw  $\mathcal{A} = \emptyset$  oder  $\mathcal{A}$  die Klasse aller partieller rekursiver Funktionen ist.*

**Beweis:** Wenn  $\mathcal{A} = \emptyset$ , dann  $\theta\mathcal{A} = \emptyset$ , und wenn  $\mathcal{A}$  die Menge aller partiellen rekursiven Funktionen ist, dann ist  $\theta\mathcal{A} = \mathbb{N}$ . Nun nehmen wir an, daß  $\mathcal{A}$  echt dazwischen liegt. Dann gibt es  $a$  und  $b$ , so daß  $\varphi_a \in \mathcal{A}$  und  $\varphi_b \notin \mathcal{A}$ . Wenn die nirgendwo definierte Funktion nicht in  $\mathcal{A}$  ist, dann setzen wir die rekursive Funktion  $f$  an als

$$\varphi_{f(x)} = \begin{cases} \varphi_a, & \text{wenn } x \in K, \\ \text{undefiniert,} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dann ist

$$x \in K \leftrightarrow \varphi_{f(x)} \in \mathcal{A} \leftrightarrow f(x) \in A.$$

Also ist  $A$  nicht rekursiv, da  $K$  nicht rekursiv ist. Falls die nirgendwo definierte Funktion nicht in  $\mathcal{A}$  ist, dann nehmen wir  $\varphi_b$  und  $\bar{K}$  und zeigen, daß  $\bar{A} = \theta(\bar{\mathcal{A}})$  nicht rekursiv ist. □



Rice' Satz ist stark, denn er umfaßt zahlreiche Unentscheidbarkeitsresultate. Jede nicht triviale Eigenschaft von Funktionen ist unentscheidbar, Zum Beispiel: die Eigenschaft, überall undefiniert zu sein, an einem festen Argument definiert zu sein, total zu sein, einen gewissen Wert im Bild zu haben, surjektiv zu sein, mit einer gegebenen partiellen rekursiven Funktion übereinzustimmen.

#### 4. Der Fixpunktsatz

Über die partiellen rekursiven Funktionen kann man nicht diagonalisieren, denn jede rekursive Diagonalisierung  $\varphi_e \mapsto \varphi_{f(e)}$  hat einen Fixpunkt.

Io sentiva osannar di coro in coro  
al punto fisso che li tiene alli ubi  
(Dante, *Paradiso*, XXVIII) 1

**SATZ 3.29.** *Der Fixpunktsatz. Kleene 1938. Zu jeder rekursiven Funktion  $f$  gibt es einen Index  $e$ , so daß*

$$\varphi_e \simeq \varphi_{f(e)}.$$

Beweis: Sei  $b$  ein Index, so daß  $\varphi$  die folgende Eigenschaft hat

$$\varphi_{\varphi_b(e)} \simeq \varphi_{f(\varphi_b(e))}.$$

Dann nehmen wir  $e = b$  und erhalten

$$\varphi_{\varphi_b(b)} \simeq \varphi_{f(\varphi_b(b))}.$$

Also ist  $\varphi_b(b)$  ein Fixpunkt von  $f$ . □

**SATZ 3.30.** *Der zweite Fixpunktsatz. Kleene 1938. Zu jeder partiellen rekursiven Funktion  $\psi$  gibt es einen Index  $e$ , so daß*

$$\varphi_e(x) \simeq \psi(e, x).$$

Wir halten irgendeine rekursive Funktion  $h$  fest. Da die Funktion  $\psi(h(z), x)$  partiell rekursiv ist, hat sie einen Index  $a$ , der von  $h$  abhängt. Nach dem s-m-n-Satz ist

$$\psi(h(z), x) \simeq \varphi_{S_1^1(a,z)}(x).$$

Dies gilt insbesondere für  $h(z) = S_1^1(z, z)$  und das  $a$  für dieses  $h$ , also

$$\varphi(S_1^1(z, z), x) \simeq \varphi_{S_1^1(a,z)}(x).$$

Nun setzen wir  $e = S_1^1(a, a)$  und erhalten

$$\psi(e, x) \simeq \psi(S_1^1(a, a), x) \simeq \varphi_{S_1^1(a,a)}(x) \simeq \varphi_e(x).$$

---

<sup>1</sup>Ich hörte von Chor zu Chor Hosanna (hoshianna hebr. errette uns) singen, zu dem Fixpunkt hin, der jeden am Platz hält

□

SATZ 3.31. Kleene 1952. Die Klasse der rekursiven Funktionen ist die kleinste Menge von Funktionen, die

1. die Ausgangsfunktionen und  $f_{FU}$  ( $s.u$ ) und die Vorgängerfunktion enthält,
2. unter Komposition abgeschlossen ist,
3. unter Definition durch Fallunterscheidung abgeschlossen ist,
4. unter Fixpunkten abgeschlossen ist.

Beweis: Unter Definition durch Fallunterscheidung verstehen wir folgendes Schema:

$$f(\vec{x}) = \begin{cases} g(\vec{x}), & \text{wenn } t(\vec{x}) = 0, \\ h(\vec{x}), & \text{sonst.} \end{cases}$$

aus partiellen rekursiven  $g, h, t$ . Wir setzen diese in die Ausgangsfunktion  $f_{FU}$  ein:

$$f_{FU}(x, y, z) = \begin{cases} x, & \text{wenn } z = 0, \\ y, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Sei nun  $\mathcal{C}$  die kleinste Menge von Funktionen, die die angegebenen Klauseln 1. bis 4. erfüllt. Dann ist  $\mathcal{C}$  eine Teilmenge der Menge der partiellen rekursiven Funktionen, denn nach dem Fixpunktsatz gibt es immer einen partiellen rekursiven Fixpunkt.

Um die umgekehrte Inklusion zu beweisen, haben wir zu zeigen, daß die primitive Rekursion und die  $\mu$ -Rekursion nicht aus  $\mathcal{C}$  hinausführen.

Primitive Rekursion. Sei

$$\begin{aligned} f(\vec{x}, 0) &= g(\vec{x}), \\ f(\vec{x}, y + 1) &= h(\vec{x}, y, f(\vec{x}, y)). \end{aligned}$$

Dann kann  $f$  als Fixpunkt der folgenden Gleichung erhalten werden

$$f(\vec{x}, y) = \begin{cases} g(\vec{x}), & \text{wenn } y = 0, \\ h(\vec{x}, y - 1, f(\vec{x}, y - 1)), & \text{sonst.} \end{cases}$$

und hier benutzen wir nur die Vorgängerfunktion, die Fallunterscheidung und die Komposition.

$\mu$ -Rekursion. Sei

$$f(\vec{x}) = \mu y (g(\vec{x}, y) = 0).$$

Dann kann zunächst  $h$  als Fixpunkt der folgenden Gleichung erhalten werden

$$h(\vec{x}, y) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } g(\vec{x}, y) = 0, \\ h(\vec{x}, y + 1) + 1, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dann ist  $f(\vec{x}) = h(\vec{x}, 0)$ , und hier benutzen wir nur die Nullfunktion, die Nachfolgerfunktion, die Fallunterscheidung und die Komposition. □

### 5. Berechnungen mit Orakeln und die Turinggrade

DEFINITION 3.32. Turing 1939. Sei  $g$  eine totale Funktion. Die Menge der in  $g$  rekursiven Funktionen ist die kleinste Menge von Funktionen, die alle Ausgangsfunktionen und  $g$  enthält und gegen Komposition, primitive Rekursion und eingeschränkte  $\mu$ -Rekursion abgeschlossen ist. Für eine Menge  $A$  ist die Menge der in  $A$  rekursiven Funktionen die Menge der in  $c_A$  rekursiven Funktionen. Ein Prädikat ist rekursiv in  $g$  oder in  $A$  wenn seine charakteristische Funktion dies ist.

χαι δη ποτε χαι εις Δελφους ελθων  
ετολμησε τοῦτο μαντευσασθαι.  
τι ποτε λεγει ο θεος;  
ου γαρ δηπου ψευδεταιιγε  
(Plato, *Socrates' Apology*)

2

Ein Orakel  $g$  ist i.a. nicht rekursiv und es hilft, die Berechnung jeder Funktion, die rekursiv in  $g$  ist, an den fraglichen Punkten weiterzuführen, an denen dann  $g$  angerufen wird. Das Orakel beantwortet jede Anfrage umsonst. Turing wählte 1939 dieses Wort.

DEFINITION 3.33. Seien  $f$  und  $g$  Funktionen. Wir sagen  $f$  ist Turing-reduzierbar auf  $g$ , in Zeichen  $f \leq_T g$ , wenn  $f$  rekursiv in  $g$  ist. Wir sagen  $f$  und  $g$  sind Turing-äquivalent und schreiben  $f \equiv_T g$ , wenn  $f \leq_T g$  und  $g \leq_T f$ .

Überlegen Sie sich, daß  $\leq_T$  transitiv, aber nicht antisymmetrisch ist!

DEFINITION 3.34. Post 1948. Die Äquivalenzklassen totaler Funktionen unter der Turing-Äquivalenz heißen *Turinggrade*. Die Menge aller Grade heißt  $\mathcal{D}$ . Die Quasihalbordnung (i.e. transitive Rel.)  $\leq_T$  induziert eine Halbordnung (i.e. antisymmetrische transitive Rel.)  $\leq$  auf den Graden. Die Struktur  $(\mathcal{D}, \leq)$  heißt die Halbordnung der Turinggrade. Die Struktur  $(\mathcal{E}, \leq)$  heißt die Halbordnung der r.e. Turinggrade.

---

<sup>2</sup>And thus once, gone even to Delphi, he dared to consult the oracle on his: what does the god say? He certainly does not lie.



## Posts Problem, die “finite injury” Methode

DEFINITION 4.1. Undatiert. Sei  $\alpha$  eine partielle Funktion. Die Menge der in  $\alpha$  partiellen rekursiven Funktion ist die kleinste Menge von Funktionen, die

- (1) die Ausgangsfunktionen  $o(x) = 0$ ,  $S(x) = x + 1$ ,  $p_i^n(\vec{x}) = x_i$  und  $\alpha$  enthält und
- (2) unter Verkettung, primitiver Rekursion und unter uneingeschränkter  $\mu$ -Rekursion abgeschlossen ist. Uneingeschränkte  $\mu$ -Rekursion bedeutet: Die Bedingung  $\forall \vec{x} \exists y \psi(\vec{x}, y) = 0$  wird fallengelassen und stattdessen setzt man

$$\varphi(\vec{x}) \simeq \mu y [\forall z \leq y \psi(\vec{x}, z) \downarrow \wedge \psi(\vec{x}, y) = 0].$$

(Die heißt nach unseren Konventionen:  $\varphi(\vec{x})$  ist nicht definiert, wenn es kein solches  $y$  gibt.)

**Vorsicht:** Nicht immer gilt das analoge Resultat für Berechenbarkeit in  $\alpha$  statt Berechenbarkeit (Slang: “the result relativizes”), nicht einmal immer für totale  $\alpha$ .

DEFINITION 4.2. Sei  $P$  die Menge der partiellen Funktionen von  $\mathbb{N}$  nach  $\mathbb{N}$ . Sei  $T$  die Menge der totalen Funktionen von  $\mathbb{N}$  nach  $\mathbb{N}$ , für Mengentheoretiker  $T = {}^{\mathbb{N}}\mathbb{N}$ .

Ein *Funktional* ist eine partielle Funktion  $F: P^k \times \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  für  $k, m \in \mathbb{N}$ . Ein *eingeschränktes Funktional* ist eine partielle Funktion  $F: T^k \times \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  für  $k, m \in \mathbb{N}$ . Ein *totales Funktional* ist eine totale Funktion  $F: T^k \times \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{N}$  für  $k, m \in \mathbb{N}$ . Es wird also nicht Totalität auf dem größeren Raum gefordert.

Wir sprechen auch über (eingeschränkte) Relationen auf Zahlen und Funktionen, indem wir uns auf das charakteristische (eingeschränkte) Funktional beziehen.

DEFINITION 4.3. Kleene 1952. Seien  $\alpha_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ , partielle Funktionen. Das Funktional  $F(\alpha_1, \dots, \alpha_m, \vec{x})$  ist ein *partielles rekursives Funktional*, wenn es aus

- (1) den Ausgangsfunktionen  $o(x) = 0$ ,  $S(x) = x + 1$ ,  $p_i^n(\vec{x}) = x_i$  und den  $\alpha_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ ,
- (2) durch Verkettung, primitive Rekursion und uneingeschränkte  $\mu$ -Rekursion herstellbar ist.

Dies bedeutet, daß  $\lambda\vec{x}.F(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \vec{x})$  *uniform* partiell rekursiv in den  $\alpha_i$ 's ist.

PROPOSITION 4.4. *Die Einsetzungseigenschaft. Kleene 1952. Wenn  $F(\alpha, z)$  und  $G(\beta, x)$  partielle rekursive Funktionale sind, dann ist such*

$$H(\alpha, x) \simeq G(\lambda z.F(\alpha, z), x)$$

*ein partielles rekursives Funktional.*

SATZ 4.5. *Der Satz von der Normalform für partielle rekursive Funktionale, Kleene 1952. Es gibt eine primitiv-rekursive Funktion  $\mathcal{U}$  und für jedes  $m, n \in \mathbb{N}$  ein primitiv-rekursives Prädikat  $\mathcal{T}_{m,n}$ , so daß für jedes partielle rekursive Funktional in  $m$  Funktionsvariablen und  $n$  Zahlvariablen ein Index  $e$  existiert, so daß:*

1.  $\forall \vec{\alpha} \forall \vec{x} (F(\alpha_1, \dots, \alpha_m, x_1, \dots, x_n) \downarrow \leftrightarrow \exists y \mathcal{T}_{m,n}(e, x_1, \dots, x_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m, y))$ .
2.  $F(\alpha_1, \dots, \alpha_m, x_1, \dots, x_n) \simeq \mathcal{U}(\mu y \mathcal{T}_{m,n}(e, x_1, \dots, x_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m, y))$ .

Beweis: Wir können die Funktionen  $\alpha_i$  nicht in den Berechnungen verwenden, da sie womöglich nicht rekursiv sind. Daher benützen wir nur endliche Anfangstücke ihrer Graphen. Wir weisen hier nur auf die Änderungen im Vergleich zum Beweis des Theorems 2.1 hin.

1. Der Index eines partiellen rekursiven Funktionals kann wie gehabt definiert werden, wir fügen nur Klauseln für die Funktionsargumente  $\alpha_i$  hinzu, als ob sie Ausgangsfunktionen wären.

2. Wir zeichnen wie gehabt Berechnungsbäume. Einige Knoten tragen nun die Beschriftung  $\alpha_i(x) = z$ .

3. Den Knoten der Berechnungsbäume werden Zahlen der Art

$$\langle e, \langle x_1, \dots, x_n \rangle, \langle \bar{\alpha}_1(K), \dots, \bar{\alpha}_m(K) \rangle, z \rangle$$

zugeordnet, wobei

$$\bar{\alpha}(K) = \prod_{k < K} p_k^{\alpha(k)+1}$$

der Anfang des Wertverlaufs für  $\alpha$  ist und, falls  $\alpha(k)$  undefiniert ist, der entsprechende Faktor ausfällt.

4. Die Definition von  $\mathcal{T}$  bleibt dieselbe außer lokalen Änderungen in den Klauseln des Typs  $B(y)$  für die atomaren Bäume: Für die Knoten mit Beschriftung  $\alpha_i(x) = z$  muß dann  $\bar{\alpha}_i(x+1)(x) = z$  eingesetzt werden.

5.  $\mathcal{T}_{m,n}$  ist definiert durch

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{m,n}(e, x_1, \dots, x_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m, y) &\leftrightarrow \mathcal{T}(y) \wedge \\ &(y)_{1,1} = e \wedge (y)_{1,2} = \langle x_1, \dots, x_n \rangle \\ &\wedge \text{lg}((y)_{1,3}) = m \wedge (\forall i)_{1 \leq i \leq m} \bar{\alpha}_i(\text{lg}((y)_{1,3,i})) = (y)_{1,3,i}. \end{aligned}$$

6. Da die Knoten im Berechnungsbaum nun Quadrupel sind, haben wir

$$\mathcal{U}(y) = (y)_{1,4}.$$

□

SATZ 4.6. *Der Satz von der Normalform für eingeschränkte partielle rekursive Funktionale, Kleene 1952. Es gibt eine primitiv-rekursive Funktion  $\mathcal{U}$  und für jedes  $m, n \in \mathbb{N}$  ein primitiv-rekursives Prädikat  $\mathcal{T}_{m,n}$  von nur numerischen Variablen, so daß für jedes eingeschränkte partielle rekursive Funktional in  $m$  Funktionsvariablen (für totale Funktionen!) und  $n$  Zahlvariablen ein Index  $e$  existiert, so daß:*

1.  $\forall \vec{y} \forall \vec{x} (F(g_1, \dots, g_m, x_1, \dots, x_n) \downarrow \leftrightarrow \exists y \mathcal{T}_{m,n}(e, x_1, \dots, x_n, \bar{g}_1(y), \dots, \bar{g}_m(y), y))$ .
2.  $F(g_1, \dots, g_m, x_1, \dots, x_n) \simeq \mathcal{U}(\mu y \mathcal{T}_{m,n}(e, x_1, \dots, x_n, \bar{g}_1(y), \dots, \bar{g}_m(y), y))$ .

Beweis: Ganz ähnlich wie oben.

DEFINITION 4.7. Seien  $e, n, s \in \mathbb{N}$ . Unter  $s$  kann man sich stage, Stadium, oder Schrittzahl vorstellen. Sei  $A \subseteq \mathbb{N}$ .

1.  $\varphi_e^{A,n}$  oder  $\{e\}^n$  ist die  $e$ -te in  $A$  partielle rekursive  $n$ -stellige Funktion:

$$\varphi_e^{A,n}(\vec{x}) \simeq \{e\}^n(\vec{x}) \simeq \mathcal{U}(\mu y (\mathcal{T}_{n,1}(e, \vec{x}, \bar{c}_A(y), y))).$$

2.  $\varphi_{e,s}^{A,n}$  oder  $\{e\}_s^{A,n}$  ist die Approximation bis zum Berechnungsbaum der Größe  $s$  für die  $e$ -te in  $A$  partielle rekursive  $n$ -stellige Funktion:

$$\varphi_{e,s}^{A,n}(\vec{x}) \simeq \{e\}_s^{A,n}(\vec{x}) \simeq \mathcal{U}(\mu y (\mathcal{T}_{n,1}(e, \vec{x}, \bar{c}_A(y), y) \wedge y < s)).$$

Wir haben also:

$$\varphi_{e,s}^{A,n}(\vec{x}) \simeq \{e\}_s^{A,n}(\vec{x}) \simeq \begin{cases} \varphi_e^{A,n}(\vec{x}) & \text{wenn } (\exists y < s) \mathcal{T}_{n,1}(e, \vec{x}, \bar{c}_A(y), y) \\ \text{undefiniert} & \text{sonst.} \end{cases}$$

DEFINITION 4.8. Wir schreiben  $W_e^{A,n} = \text{dom}(\varphi_e^{A,n})$  und  $W_{e,s}^{A,n} = \text{dom}(\varphi_{e,s}^{A,n})$ .

KOROLLAR 4.9. *Kleene 1952 Wenn  $F(\alpha, x)$  ein partielles rekursives Funktional ist und  $F(\alpha, x) \simeq y$ , dann gilt die Kompaktheit: Es gibt eine endliche Funktion  $u \subseteq \alpha$ , so daß  $F(u, x) \simeq y$ , und es gilt die Monotonie,  $\alpha \subseteq \beta$  impliziert  $F(\beta, x) \simeq y$ .*

Welche Grade kennen wir?

DEFINITION 4.10.  $\mathfrak{o}'$ , gelesen "o jump" oder „der Sprung von o", ist der Grad von  $K$  (oder von  $K_0$ ),  $\mathfrak{o}$  ist der Grad der rekursiven Mengen.

Natürlich ist  $\mathfrak{o} \neq \mathfrak{o}'$ .

PROPOSITION 4.11. *A r.e. Dann ist  $\text{deg}(A) \leq \mathfrak{o}'$ .*

Beweis:  $A = W_e$  für ein  $e$ . Dann ist  $x \in A \leftrightarrow \langle x, e \rangle \in K_0$ . Der Beweis für  $K$  anstelle von  $K_0$  geht am besten mit dem s-m-n-Satz. Führen Sie ihn als Übung. □

$\mathfrak{o}'$  ist also maximal unter den Graden rekursiv aufzählbarer Mengen. Gibt es noch weitere Grade?

PROPOSITION 4.12.  $A \leq_T B$  gdw  $(\exists x)(\forall y)(y \in A \leftrightarrow y \in W_x^B)$  und  $(\exists x)(\forall y)(y \in \bar{A} \leftrightarrow y \in W_x^B)$ .

Beweis: Dies ist die auf  $B$ -Berechenbarkeit und  $B$ -Aufzählbarkeit relativierte Form von Satz 3.16.  $\square$

FRAGE 4.13. *Post 1944. "Post's problem". Gibt es eine r.e. Menge  $A$ , so daß  $A$  nicht rekursiv ist und  $K \not\leq_T A$  ist?*

Wir folgen nun Hartley Rogers Juniors Darstellung aus dem Klassiker der Rekursionstheorie: "Theory of Recursive Functions and Effective Computability" MIT Press 1987, unveränderter Nachdruck der Auflage von 1967, pp. 163 – 166. In Odifreddis Buch nimmt die Beantwortung der Postschen Frage 35 Seiten in Anspruch und ist daher für unsere kurze Vorlesung nicht geeignet, obwohl Odifreddis Darstellung natürlich ausgezeichnet ist. Posts Frage war zwölf Jahre offen, und Odifreddi beschreibt die geschichtliche Entwicklung zahlreicher Versuche bis zur Lösung durch Friedberg und Muchnik 1956, unabhängig voneinander.

Sie können in Odifreddi (pp 250 – 304) finden, warum nur so eine inkonstruktive Methode (finite injury priority method genannt) zum Ziel führen kann. Doch nun Schluß mit den Geschichten und in medias res:

SATZ 4.14. *Friedberg, Muchnik, 1956. Es gibt zwei r.e. Mengen  $A$  und  $B$ , so daß  $A \not\leq_T B$  und  $B \not\leq_T A$ .*

DEFINITION 4.15. Wir kodieren endliche Mengen  $\{n_0, \dots, n_{k-1}\}$  durch Dualentwicklungen  $u = \sum_{i < k} 2^{n_i}$ . Diese Kodierung hat eine rekursive Umkehrung: Für  $u = \sum_{i < k} 2^{n_i}$  setzen wir  $D_u = \{n_i \mid i < k\}$ .

LEMMA 4.16. *Es gibt eine rekursive totale Funktion  $\rho$ , so daß für alle endlichen  $D$*

$$W_z^D = \{x \mid \exists u, v, w \langle x, u, v, w \rangle \in W_{\rho(z)} \wedge D_u \subseteq D \wedge D_v \subseteq \bar{D}\}$$

Beweis: Wir nützen den Kompaktheit und die Monotonie der Orakelberechnungen und den Normalformensatz für eingeschränkte Funktionale. Genaues können Sie auf Seite 254 in Proposition III.1.4. in Odifreddi nachlesen.  $\square$

Wir bezeichnen mit  $(W_z^D)_n$  die Menge derjenigen  $x$ , die in  $\leq n$  Rechenschritten in  $W_{\rho(z)}$  gefunden werden (für genügend großes  $n$ , so daß die Prüfungen  $D_u \subseteq D$  und  $D_v \subseteq \bar{D}$  auch innerhalb dieser Schritte durchgeführt sind und erfolgreich verlaufen sind).

LEMMA 4.17. *Seien die  $A_i$  endliche Mengen und  $A_{i+1} \supseteq A_i$  und  $A = \bigcup A_i$ . Dann gilt*

$$\forall a, z (a \in W_z^A \rightarrow (\exists m = m(a, z, (A_i)_i)) (\forall n \geq m) (a \in (W_z^{A_n})_n)).$$



Beweis: Sei  $a \in W_z^A$ . Dann werden zu dieser Verifikation nur endlich viele Anfragen an das Orakel gestellt, sagen wir, Anfragen an  $A \upharpoonright m' = A \cap \{0, 1, \dots, m' - 1\}$ . Dann gibt es ein  $m \geq m'$ , so daß für alle  $n \geq m$   $A \upharpoonright m' = A_n \upharpoonright m'$ .  $\square$

Beweis von 4.5: Wir müssen Anweisungen für die Aufzählungen von  $A$  und  $B$  geben und sicherstellen, daß es zwei Funktionen  $f$  und  $g$  gibt, so daß

$$(\forall x)(f(x) \in A \leftrightarrow f(x) \in W_x^B)$$

(also für alle  $x$ ,  $\bar{A} \neq W_x^B$ ) und

$$(\forall x)(g(x) \in B \leftrightarrow g(x) \in W_x^A).$$

In Odifreddis Buch wird gezeigt, daß solche  $f$  und  $g$  nicht rekursiv sein können.

Die Konstruktion dieser  $A$  und  $B$  wird in Schritten vorgenommen. Ein Schritt zerfällt in mehrere Teilschritte, die nicht gezählt werden. Enorm wichtig ist der Zähler  $2n + 1$  oder  $2n + 2$  für die jeweilige Schrittzahl.

$A$  und  $B$  werden als aufsteigende Vereinigungen endlicher Mengen konstruiert. Am Anfang besteht die  $A$ -Liste aus  $\mathbb{N}$  und die  $B$ -Liste aus  $\mathbb{N}$ .

$$A_n = \{x \mid x \text{ erhält ein } + \text{ in der } A\text{-Liste in einem Schritt } \leq n\}.$$

$$B_n = \{x \mid x \text{ erhält ein } + \text{ in der } B\text{-Liste in einem Schritt } \leq n\}.$$

Die gesetzten  $+$ -Zeichen werden nie mehr weggenommen. Außerdem gibt es noch  $-$ -Zeichen und zweimal unendlich viele Marken

$$\boxed{i}_1, i \in \omega, \text{ für die } A\text{-Liste}$$

$$\boxed{i}_2, i \in \omega, \text{ für die } B\text{-Liste.}$$

Die Marken müssen nicht nach der Größe ihrer Aufschriften auf den Listen sitzen. Im  $n$ -ten Schritt sind  $n$  Marken gesetzt. Marken dürfen nur zu größeren Elementen derselben Liste verschoben werden. Wir werden zeigen, daß jede Marke nur endlich oft verschoben wird. Minusse dürfen in Plusse verändert werden. Plusse verschwinden nie mehr.

Wenn sich die Marke  $\boxed{j}_1$  nicht mehr bewegt, dann soll sie auf einer Zahl  $x_j$  stehen, so daß  $x_j \in A \leftrightarrow x_j$  hat ein  $+$   $\leftrightarrow x_j \in W_j^B$ . Wenn wir dies für jedes  $\boxed{j}_1$  arrangieren können, dann haben wir  $(\forall j)(\exists x_j)(x_j \in A \leftrightarrow x_j \in W_j^B)$  und daher  $A \not\leq_T B$ .

Definition: Zu jeder Schrittzahl sagen wir eine Zahl ist *frei* in einer Liste, wenn keine größere oder gleiche Zahl ein  $+$  oder ein  $-$  oder eine Marke  $\boxed{j}_k$  trägt. Eine Zahl heißt *vakant* zu einer Schrittzahl, wenn sie kein Pluszeichen trägt.

Schritt 1: Setze  $\boxed{0}_1$  auf die 0 der  $A$ -Liste.

Schritt 2: Setze  $\boxed{0}_2$  auf die 0 in der  $B$ -Liste.

...

Schritt  $2n + 1$ : Setze  $\boxed{n}_1$  auf die kleinste freie Zahl in der  $A$ -Liste. Seien (notwendigerweise aufsteigend)  $a_0^{(n)}, a_1^{(n)}, \dots, a_n^{(n)}$  die gegenwärtigen Stellungen der Marken  $\boxed{0}_1, \dots, \boxed{n}_1$ . Berechne  $n$  Schritte in der Aufzählungen von  $W_0^{B_{2n}}, W_1^{B_{2n}}, \dots, W_n^{B_{2n}}$ . Sei  $a_j^{(n)}$  das kleinste Element von  $\{a_0^{(n)}, \dots, a_n^{(n)}\}$ , das vakant ist und das in  $(W_j^{B_{2n}})_n$  vorkommt. Wenn es kein solches  $a_j^{(n)}$  gibt, dann gehe zu Schritt  $2n + 2$ . Wir setzen ein  $+$  auf  $a_j^{(n)}$  in der  $A$ -Liste und ein  $-$  auf jede der vakanten Zahlen in der  $B$ -Liste, deren zu  $\bar{B}_{2n}$ -Gehören ausgenutzt wurde zur Berechnung von  $a_j^{(n)} \in W_j^{B_{2n}}$ . Wenn  $j < n$ , dann bewege alle Marken in der  $B$ -Liste  $\boxed{i}_2$ ,  $j \leq i < n$ , zu größeren Zahlen, nämlich zu den ersten  $n - j$  freien Zahlen in der  $B$ -Liste.

Schritt  $2n + 2$ : Setze  $\boxed{n}_2$  auf die kleinste freie Zahl in der  $B$ -Liste. Seien (notwendigerweise aufsteigend)  $b_0^{(n)}, b_1^{(n)}, \dots, b_n^{(n)}$  die gegenwärtigen Stellungen der Marken  $\boxed{0}_2, \dots, \boxed{n}_2$ . Berechne  $n$  Schritte in der Aufzählungen von  $W_0^{A_{2n+1}}, W_1^{A_{2n+1}}, \dots, W_n^{A_{2n+1}}$ . Sei  $b_j^{(n)}$  das kleinste Element von  $\{b_0^{(n)}, \dots, b_n^{(n)}\}$ , das vakant ist und das in  $(W_j^{A_{2n+1}})_n$  vorkommt. Wenn es kein solches  $b_j^{(n)}$  gibt, dann gehe zu Schritt  $2n + 3$ . Wir setzen ein  $+$  auf  $b_j^{(n)}$  in der  $B$ -Liste und ein  $-$  auf jede der vakanten Zahlen in der  $A$ -Liste, deren zu  $\bar{A}_{2n+1}$ -Gehören ausgenutzt wurde zur Berechnung von  $b_j^{(n)} \in W_j^{A_{2n+1}}$ . Wenn  $j < n$ , dann bewege alle Marken in der  $A$ -Liste  $\boxed{i}_1$ ,  $j < i \leq n$  (beachten Sie den Unterschied zur ungeraden Schrittzahl!), zu größeren Zahlen, nämlich zu den ersten  $n - j$  freien Zahlen in der  $A$ -Liste.

Induktiv über  $n$  zeigt man, daß  $\boxed{n}_1$  und  $\boxed{n}_2$  nur endlich oft bewegt werden:  $\boxed{0}_1$  wird niemals bewegt,  $\boxed{0}_2$  wird höchstens einmal bewegt,  $\boxed{1}_1$  wird höchstens einmal bewegt für jede Stellung von  $\boxed{0}_2$ , also höchstens zweimal.  $\boxed{1}_2$  kann höchstens einmal bei jeder Stellung von  $\boxed{0}_1$  und von  $\boxed{1}_1$  bewegt werden. Durch Addieren  $\sum_{i < k} 2^i = 2^k + 1 - 1$  und nach oben Abschätzen erhält man  $\boxed{j}_2$  wird höchstens  $2^{2j} - 1$  Mal bewegt.

Sei  $f(x)$  die Schlußstellung von  $\boxed{x}_1$  und sei  $g(x)$  die Schlußstellung von  $\boxed{x}_2$ . Wir nehmen an, daß  $f(x) \in A$ . Dann erhält  $f(x)$  ein  $+$  zu einer Schrittzahl  $2n+1$  und kein Minus wird jemals wieder zu einem Plus geändert. Wenn ein  $k < x$  mit Marke  $\boxed{k}_2$  ein Minus zu einem Plus ändern würde, dann würde  $\boxed{x}_1$  wieder zu einer größeren Zahl bewegt und neu bearbeitet, und es wäre also noch nicht in der Schlußstellung. Also ist  $f(x) \in W_x^B$ . Umgekehrt, wenn  $f(x) \in W_x^B$ , dann gibt es ein  $m$ , so daß  $f(x) \in (W_x^{B_{2n}})_n$  für alle  $n \geq m$ , und, da  $f(x)$  die Schlußstellung von  $\boxed{x}_1$  ist, muß  $f(x)$  ein  $+$  erhalten, und daher ist  $f(x) \in A$ .

Genauso zeigt man  $g(x) \in B \leftrightarrow g(x) \in W_x^A$ . Also  $A \not\leq_T B$  und  $B \not\leq_T A$ .  $\square$

Nun werden wir auch Hartley Rogers Jr. untreu und folgen von nun an dem technischsten der mir bekannten Rekursionstheoriebücher: Robert I. Soare, *Recursively Enumerable Sets and Degrees*, Springer 1989. Im Lichte von Soares Darstellung ist die Geschichte mit den Marken, Plus- und Minuszeichen zu "anthropomorphic". Wir steigen ein auf Seite 122, Theorem 3.1.

DEFINITION 4.18.  $A$  heißt *einfach* (simple), wenn  $A$  r.e. ist und  $\bar{A}$  unendlich ist und für alle  $e$  gilt:  $W_e \cap A \neq \emptyset$ , falls  $W_e$  unendlich ist.

ÜBUNG 4.19. Wenn  $A$  einfach ist, dann ist  $A$  nicht rekursiv.

SATZ 4.20. (Vorstufe zu Sacks' Splitting Satz) Sei  $C$  r.e. und nicht rekursiv. Dann gibt es eine einfache Menge  $A$ , so daß  $C \not\leq_T A$ .

Beweis: Für jedes  $e \in \omega$  sind folgende Forderungen zu erfüllen:

$$N_e : C \neq \varphi_e^A$$

$$P_e : W_e \text{ unendlich} \rightarrow W_e \cap A \neq \emptyset.$$

$N_e$  steht für negativ,  $P_e$  steht für positiv.

Sei  $\langle C_s \mid s < \omega \rangle$  eine rekursive Aufzählung von  $C$ . Die Konstruktion von  $A$ :

DEFINITION 4.21.  $u(A, e, x, s) = 1 +$  die größte Zahl, die in der Berechnung vorkommt, wenn  $\varphi_{e,s}^A(x) \downarrow$  und  $= 0$  sonst.

$$u(A, e, x) = \begin{cases} \min\{u(A, e, x, s) \mid \varphi_{e,s}^A(x) \downarrow\}, & \text{falls } \varphi_e^A(x) \downarrow, \\ \text{undefiniert,} & \text{falls } \varphi_e^A(x) \uparrow. \end{cases}$$

$u$  heißt die use function.

Schritt  $s = 0$ . Sei  $A_0 = \emptyset$ .

Schritt  $s + 1$ : Sei  $A_s$  schon definiert. Wir definieren für jedes  $e$

$$\text{length } \ell(e, s) = \max\{x \mid (\forall y < x) \varphi_{e,s}^{A_s}(y) \downarrow = C_s(y)\};$$

$$\text{restraint } r(e, s) = \max\{u(A_s, e, x, s) \mid x \leq \ell(e, s)\}.$$

Wir sagen, daß  $P_i$  im Stadium  $s + 1$  bearbeitet werden muß, wenn  $i \leq s$  und  $W_{i,s} \cap A_s = \emptyset$  und

$$(\exists x)(x \in W_{i,s} \wedge x > 2i \wedge (\forall e \leq i) r(e, s) < x).$$

Wir nehmen in  $A_{s+1}$  für jedes  $i$  ein kleinstes  $x$  auf, so daß  $x$  bezeugt, daß  $P_i$  bearbeitet werden muß im Zustand  $s + 1$ . Wir sagen, daß  $P_i$  im Stadium  $s + 1$  bearbeitet wird.

BEMERKUNG 4.22. Sei  $e$  fest. Wir nehmen an, daß kein  $P_j$  für  $j < e$  im Stadium  $s + 1$  bearbeitet wird. Dann gelten:

(1) Für  $y < \ell(e, s)$  und  $z \in A_{s+1} \setminus A_s$  haben wir  $z > u(A_s, e, y, s)$  und

$$\varphi_{e,s+1}^{A_{s+1}}(y) \downarrow = \varphi_{e,s}^{A_{s+1}}(y) \downarrow = \varphi_{e,s}^{A_s}(y) = C_s(y)$$

und  $u(A_{s+1}, e, y, s + 1) = u(A_s, e, y, s)$ .

- (2) Für  $y = \ell(e, s)$  und  $z \in A_{s+1} \setminus A_s$  ist  $z > u(A_s, e, y, s)$ , da in der Definition von  $r(e, s)$   $x \leq \ell(e, s)$  steht, und daher folgt aus  $\varphi_{e,s}^{A_s}(x) \downarrow$ , daß

$$\varphi_{e,s}^{A_{s+1}}(y) \downarrow = \varphi_{e,s}^{A_{s+1}}(y) \downarrow = \varphi_{e,s}^{A_s}(y) \neq C_s(y)$$

und  $u(A_{s+1}, e, y, s+1) = u(A_s, e, y, s)$ .

Die negative Forderung  $N_e$  kann im Stadium  $s+1$  (höchstens) verletzt werden durch ein Element  $x$ , wenn  $x \leq r(e, s)$  und  $x \in A_{s+1} \setminus A_s$ . Diese Elemente, für alle  $s$  zusammen genommen, bilden eine r.e. Menge

$$I_e = \{x \mid (\exists s)(x \in A_{s+1} \setminus A_s \wedge x \leq r(e, s))\}.$$

$|I_e| \leq e$ , da jedes  $N_e$  höchstens einmal durch jedes  $P_i$ ,  $i < e$ , verletzt wird, woraufhin  $P_i$  für immer erfüllt wird.

LEMMA 4.23.  $(\forall e)(C \neq \varphi_e^A)$ .

Beweis: Wir nehmen an, daß  $C = \varphi_e^A$ . Dann ist  $\lim_s \ell(e, s) = \infty$ . Wir nehmen ein  $s'$ , so daß  $N_e$  in keinem Stadium nach  $s'$  mehr verletzt wird. Dann werden wir, im Gegensatz zu unserer Voraussetzung,  $C$  berechnen:

Um  $C(p)$  zu berechnen, nehmen wir das kleinste  $s > s'$ , so daß  $\ell(e, s) > p$ . Durch Induktion über  $t > s$  folgt

$$(*) (\forall t \geq s)(\ell(e, t) > p \wedge r(e, t) \geq \max\{u(A_s, e, x, s) \mid x \leq p\}),$$

und daher ist  $\varphi_{e,s}^{A_s}(p) = \varphi_e^{A_s}(p) = \varphi_e^A(p) = C(p)$ , und daher ist  $C$  rekursiv.

Nun beweisen wir (\*). Wir nehmen an, daß es für  $t$  gilt. Nach der Bemerkung sichern  $r(e, t)$  und  $s > s'$ , daß  $A_{t+1} \upharpoonright z = A_t \upharpoonright z$  für alle  $z$ , die in  $\varphi_{e,t}^{A_t}(x) = y$  verwendet werden, für alle  $x \leq p$ . Daher ist  $\varphi_{e,t+1}^{A_{t+1}}(x) = y$  und daher  $\ell(e, t+1) > p$ , außer wenn  $C_{t+1}(x) \neq C_t(x)$  für ein  $x < \ell(e, t)$ . Aber wenn  $C_t(x) \neq C_s(x)$  für ein  $t \geq s$  und minimales  $x \leq p$ , dann sichert die Definition von  $r(e, t)$  und " $\leq \ell(e, t)$ " darin, daß die Ungleichung  $C_t(x) \neq \varphi_{e,t}^{A_t}(x)$  für immer erhalten bleibt, im Gegensatz zu unsere Annahme  $C = \varphi_e^A$ . Widerspruch.

Sacks' Strategie wird manchmal beschrieben als eine, die Übereinstimmungen erhält. Aber es ist auch entscheidend, daß mindestens eine Nichtübereinstimmung erhalten wird, wenn dies möglich ist. Die Nichtübereinstimmung wird erhalten, da  $C$  r.e. ist und  $C_s(x)$  nur von 0 zu 1 geändert werden kann und nicht umgekehrt.  $\square$

LEMMA 4.24. *Für jedes  $e$  gibt es ein  $t$  so daß für alle  $s \geq t$   $r(e, s) = r(e, t)$ . (Wir schreiben  $r(e, t) = \lim_s r(e, s)$  und überlegen Sie sich, daß schließliche Konstanz die einzige Möglichkeit für die Existenz eines endlichen Grenzwertes in  $\omega$  mit der diskreten Topologie ist.)*

Beweis: Nach dem vorigen Lemma gibt es ein  $p$ , so daß  $p = \mu x(C(x) \neq \varphi_e^A(x))$ . Wir nehmen ein genügend großes  $s'$ , so daß für alle  $s \geq s'$  folgendes gilt:

- (1)  $(\forall x \leq p)(\varphi_{e,s}^{A_s}(x) \downarrow = \varphi_e^A(x))$ ,
- (2)  $(\forall x \leq p)(C_s(x) = C(x))$  und
- (3)  $N_e$  wird nicht verletzt im Stadium  $s$ .

Erster Fall:  $(\forall s \geq s')\varphi_{e,s}^{A_s}(p) \uparrow$ . Dann  $r(e, s) = r(e, s')$  für alle  $s \geq s'$ .

Zweiter Fall:  $\varphi_{e,t}^{A_t}(p) \downarrow$  zu einem Stadium  $t \geq s$ . Dann ist  $\varphi_{e,s}^{A_s}(p) = \varphi_{e,t}^{A_t}(p)$  für alle  $s \geq t$ , weil  $\ell(e, s) \geq p$ . Nach der Definition von  $r(e, s)$  bleibt die Berechnung  $\varphi_{e,t}^{A_t}(p)$  immer erhalten. Daher ist  $\varphi_e^A(p) = \varphi_{e,s}^{A_s}(p)$ . Aber  $C(p) \neq \varphi_e^A(p)$ .

Daher ist  $(\forall s \geq t)(C_s(p) \neq \varphi_{e,s}^{A_s}(p) \wedge \ell(e, s) = p \wedge r(e, s) = r(e, t))$  und  $r(e, t) = \lim_s r(e, s)$ .  $\square$

LEMMA 4.25.  $(\forall e)(W_e \text{ unendlich} \rightarrow W_e \cap A \neq \emptyset)$ .

Beweis: Nach dem vorigen Lemma ist  $r(i) = \lim_s r(i, s)$  für  $i \leq s$  und  $R(e) = \max\{r(i) \mid i \leq e\}$ . Dann impliziert

$$(\exists x)(x \in W_e \wedge x > 2e \wedge x > R(e)),$$

daß  $W_e \cap A \neq \emptyset$ . Die Bedingung  $x > 2e$  impliziert, daß  $\bar{A}$  unendlich ist, und daher ist  $A$  einfach.  $\square$

DEFINITION 4.26. Ein Grad  $\mathbf{a} \leq \mathbf{o}'$  heißt *niedrig* oder *low*, wenn  $\mathbf{a}' = \mathbf{o}'$  (das heißt, daß der Sprung von  $\mathbf{a}$  den niedrigsten möglichen Grad hat) und *hoch* oder *high*, wenn  $\mathbf{a}' = \mathbf{o}''$  (also  $\mathbf{a}'$  den höchsten möglichen Grad annimmt.) Eine Menge  $A$  ist niedrig/hoch, wenn ihr Grad  $\deg(A)$  niedrig/hoch ist.

SATZ 4.27. *Sacks' Splitting Theorem. Sacks 1963. Seien  $B$  und  $C$  r.e. Mengen und sei  $C$  nicht rekursiv. Dann gibt es low r.e. Mengen  $A_0$  und  $A_1$ , so daß*

- (1)  $A_0 \cup A_1 = B$  und  $A_0 \cap A_1 = \emptyset$ .
- (2)  $C \not\leq_T A_i$  für  $i = 0, 1$ .

Beweis: Wir nehmen an, daß  $B$  unendlich ist, denn sonst ist das Resultat trivial. Diese Annahme beeinträchtigt jedoch nicht die uniforme Berechenbarkeit von  $A_0, A_1$  von  $B$  und  $C$  aus. Seien  $(B_s)_{s \in \omega}$  und  $(C_s)_{s \in \omega}$  rekursive Aufzählungen von  $B$  und  $C$ , so daß  $B_0 = \emptyset$  und  $|B_{s+1} \setminus B_s| = 1$  für alle  $s$ . Wir werden rekursive Aufzählungen  $(A_{i,s})_{s \in \omega}$ ,  $i = 0, 1$ , für  $A_i$  geben, die die einzige positive Forderung

$$x \in B_{s+1} \setminus B_s \rightarrow (x \in A_{0,s+1} \vee x \in A_{1,s+1})$$

in die negativen Forderungen für  $i = 0, 1$  und alle  $e$

$$N_{e,i} : C \neq \varphi_e^{A_i}$$

erfüllen. Die Niedrigkeit von  $A_i$  wird automatisch aus den negativen Forderungen folgen.

Stadium  $s = 0$ : Wir setzen  $A_{i,0} = \emptyset$ ,  $i = 0, 1$ .

Stadium  $s + 1$ : Für  $A_{i,s}$  definieren wir die rekursiven Funktionen  $\ell^i(e, s)$  und  $r^i(e, s)$  wie im Beweis des vorigen Satzes. Sei  $x \in B_{s+1} \setminus B_s$ . Wir nehmen das kleinste  $\langle e', i' \rangle$ , so daß  $x \leq r^i(e, s)$  und nehmen dann dieses in  $A_{1-i',s+1}$  auf. Wenn es keine solche  $\langle e', i' \rangle$  gibt, dann nehmen  $x$  in  $A_0$  auf.

Um zu sehen, daß die Konstruktion gelingt, definieren wir die Menge der womöglich verletzten Bedingungen  $I_e^i$  wie im Beweis des vorigen Satzes. Durch Induktion über  $\langle e, i \rangle$  zeigt man für alle  $e, i$

- (1)  $I_e^i$  ist endlich,
- (2)  $C \neq \varphi_e^{A_i}$ , und
- (3)  $r^i(e) = \lim_s r^i(e, s)$  existiert und ist endlich.

Mögen (1), (2) und (3) schon für alle  $\langle k, j \rangle < \langle e, i \rangle$  gelten. Nach (3) nehmen wir ein  $t$ , so daß  $r(k, s) = r(k)$  für alle  $\langle k, j \rangle < \langle e, i \rangle$  für alle  $s \geq t$ . Dann nehmen wir  $r \geq r^j(k)$  für alle solchen  $k$ . Wir nehmen ein  $v > t$ , so daß  $B \upharpoonright r = B_v \upharpoonright r$ . Dann ist  $N_{\langle e, i \rangle}$  nach Stadium  $v$  nie mehr verletzt und daher gilt (1) für  $\langle e, i \rangle$ . Dann folgen wir in den ersten beiden Lemmata im Beweis des vorigen Satzes auch (2) und (3).

Um zu sehen, daß alle  $A_i$  niedrig sind, definieren wir eine rekursive Funktion  $g$  wie folgt.

$$\varphi_{g(e)}^X(y) = \begin{cases} C(0), & \text{wenn } y = 0 \text{ und } \varphi_e^X(e) \downarrow, \\ \text{undefiniert,} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Nun haben wir für  $i = 0, 1$

$$e \in A_i' \leftrightarrow \varphi_e^{A_i}(e) \downarrow \leftrightarrow \varphi_{g(e)}^{A_i}(e)(0) = C(0) \leftrightarrow \lim_s \ell^i(g(e), s) > 0,$$

also ist  $A_i'$  von der syntaktischen Komplexität  $\Delta_2^0$ , da  $\ell^i$  und  $f$  rekursive Funktionen sind und da  $\lim_s(g(e), s)$  existiert. Daher ist nach einem Satz von Post  $A_i' \leq_T \mathbf{o}'$ .  $\square$

**ÜBUNG 4.28.** *Beachten Sie, daß die Verletzungsmengen  $I_e^i$  zwar endlich sind, es jedoch keine rekursive Funktionen  $f(e, i)$  als Obergrenze ihrer Mächtigkeit  $|I_e^i| \leq f(e, i)$  gibt. Beweisen Sie dies!*

## Die infinite injury priority Methode

Nun folgen wir Soare, *Recursively Enumerable Sets and Degrees*, Springer 1987. Kapitel VIII.

Sei  $\langle A_s \mid s \in \omega \rangle$  eine rekursive Aufzählung einer r.e. Menge  $A$ . Wie definieren

$$a_s = \begin{cases} \mu x (x \in A_s \setminus A_{s-1}), & \text{wenn } A_s \setminus A_{s-1} \neq \emptyset, \\ \max(A_s \cup \{s\}) & \text{sonst.} \end{cases}$$

$$\hat{\varphi}_{e,s}(A_s; x) = \begin{cases} \varphi_{e,s}(A_s; x), & \text{wenn dieses def. ist und } u(A_s; e, x, s) < a_s, \\ \text{undefiniert,} & \text{sonst.} \end{cases}$$

$$\hat{u}(A_s; e, x, s) = \begin{cases} u(A_s; e, x, s) & \text{wenn } \hat{\varphi}_{e,s}(A_s; x) \text{ definiert ist,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

$$T = \{s \mid A_s \upharpoonright a_s = A \upharpoonright a_s\}$$

ist die Menge der wahren Berechnungsschritte von  $\langle A_s \mid s < \omega \rangle$ .  $T$  ist unendlich, da  $\{s \mid (\forall t > s)(a_t \geq a_s)\}$  unendlich ist, da wiederum  $\{a_s \mid s \in \omega\}$  unendlich ist. Die einfachste Anwendung dieser Methode ist das Dicke-Teilmenge Lemma (thickness lemma).

Hierzu benötigen wir einige Definitionen:

DEFINITION 5.1. Sei  $A \subseteq \omega$ . Dann definieren wir  $A^{[y]} = \{\langle x, y \rangle \mid \langle x, y \rangle \in A\}$  und  $A^{[<y]} = \bigcup_{z < y} A^{[z]}$ .  $A \subseteq B$  heißt eine *dicke Teilmenge* von  $B$  wenn  $A^{[y]} =^* B^{[y]}$  für alle  $y$ .  $B$  heißt *stückweise rekursiv*, wenn für alle  $y$ ,  $B^{[y]}$  rekursiv ist.

Das folgende Lemma wurde 1961 von Shoenfield im Fall  $C = \mathbf{o}'$  bewiesen. Für allgemeines  $C$  verlangt das Lemma Sacks' Erhaltungsmethode zusammen mit der infinite injury Methode, so wie sie zum ersten Mal von Sacks 1963 entwickelt wurden. Wir folgen der Lachlanschen Darstellung von 1973. Auch  $a_s$ ,  $\hat{\varphi}$ ,  $\hat{u}$  und  $T$  wurden von Lachlan eingeführt.

SATZ 5.2. *Thickness Lemma.* Sei  $C$  r.e. und nicht rekursiv und sei  $B$  stückweise rekursiv und r.e. Dann gibt es eine dicke Teilmenge  $A$  von  $B$ , so daß  $C \not\leq_T A$ .

Beweis: Wir halten rekursive Funktionen  $(B_s)_{s \in \omega}$  und  $(C_s)_{s \in \omega}$ , die  $B$  und  $C$  aufzählen, fest. Sei  $A_0 = \emptyset$ . Zu gegebenem  $(A_t)_{t \leq s}$  definieren wir  $\hat{\varphi}_{e,s}^{A_s}$  wie oben. Wir definieren die anderen Funktionen wie in der Vorstufe zu Sacks' Splitting Satz (Satz 4.20), aber mit  $\hat{\varphi}_{e,s}$  anstelle von  $\varphi_{e,s}$ :

$$\text{length } \hat{\ell}(e, s) = \max\{x \mid (\forall y < x) \hat{\varphi}_{e,s}^{A_s}(y) \downarrow = C_s(y)\};$$

$$\begin{aligned} \text{restraint } \hat{r}(e, s) &= \max\{u(A_s, e, x, s) \mid x \leq \hat{\ell}(e, s)\}. \\ \text{injury set } \hat{I}_{e,s} &= \{x \mid (\exists v \leq s)(x \in A_{v+1} \setminus A_v \wedge x \leq \hat{r}(e, v))\}. \\ \hat{I}_e &= \bigcup_s \hat{I}_{e,s}. \end{aligned}$$

Um die Forderungen

$$P_e : B^{[e]} =^* A^{[e]} \text{ und } N_e : C \neq \varphi_e^A, \quad e \in \omega,$$

zu erfüllen, nehmen wir  $x$  in  $A_{s+1}^{[e]}$  auf genau dann, wenn  $x \in B_{s+1}^{[e]}$  und  $x > \hat{r}(i, s)$  für alle  $i < e$ . Dann erhalten wir  $\hat{I} \leq_T A^{[<e]}$ , da  $x \in A_s^{[<e]}$  gdw  $x \in \hat{I}_{e,s}$ .

Wir halten  $e$  fest und nehmen die Induktionsvoraussetzung, daß  $C \neq \varphi_e^A$  und  $A^{[i]} =^* B^{[i]}$  für alle  $i < e$  an. Dann ist  $A^{[<e]} =^* B^{[<e]}$  rekursiv und daher ist  $\hat{I}_e$  rekursiv. Die folgenden Lemmata sind ähnlich zu denen im Beweis des Satzes 4.20, doch werden nur die wahren Stadien betrachtet.

LEMMA 5.3.  $C \neq \varphi_e^A$ .

Beweis: Wir nehmen indirekt an, daß  $C = \varphi_e^A$ . Dann ist  $\lim_s \hat{\ell}(e, s) = \infty$ . Wir zeigen nun  $C \leq_T \hat{I}_e$ , und dies widerspricht der Nichtrekursivität von  $C$ , da die  $\hat{I}_e$  rekursiv sind. Um  $C(p)$  mit dem Orakel  $\hat{I}_e$  zu berechnen, finden wir ein  $s$ , so daß  $\hat{\ell}(e, s) > p$  und

$$(\forall x \leq p)(\forall z)(z \leq u(A_s, e, x, s) \rightarrow (z \notin \hat{I}_e \vee z \in A_s))$$

Solch ein  $s$  existiert, da  $C = \varphi_e^A$ . Wie in den Bemerkungen vor Lemma 1 im Beweis zu 4.20 folgt nun induktiv für  $t \geq s$

$$(\forall t \geq s)(\hat{\ell}(e, t) > p \wedge \hat{r}(e, t) \geq \max\{\hat{u}(A_s, e, x, s) \mid x \leq p\})$$

und daher ist  $\varphi_{e,s}^{A_s}(p) = \varphi_e^{A_s}(p) = \varphi_e^A(p) = C(p)$  und daher ist  $C$  also rekursiv.  $\square$

LEMMA 5.4. Sei  $T$  die Menge der wahren Stadien in der Aufzählung  $(A_s)_{s \in \omega}$  von  $A$ . Dann ist  $\lim_{t \in T} \hat{r}(e, t) < \infty$ .

LEMMA 5.5.  $(\forall e)A^{[e]} =^* B^{[e]}$ .

Beweis: Jedes  $x \in B^{[e]}$ , so daß  $x > \hat{R}(e) = \lim_{t \in T} \hat{R}(e, t)$ , wird in  $A^{[e]}$  aufgenommen.  $\square$



## Literaturverzeichnis

- [1] Thomas Jech. *Set Theory*. Addison Wesley, 1978.
- [2] Hartley Rogers Jr. *Theorie of Recursive Functions and Effective Computability*. McCraw-Hill, 1967.
- [3] Stephen Cole Kleene. *Introduction to Metamathematics*. North Holland, 1952.
- [4] Yuri Matyasevich. Diophantine sets. *Usp. Mat. Nauk*, 27:185–222, 1972.
- [5] Piergiorgio Odifreddi. *Classical Recursion Theory*. Elsevier, 1989.
- [6] Rosza Péter. *Rekursive Funktionen*. Akadémiai Kiado, 1951.
- [7] H. E. Rose. *Subrecursion: Functions and hierarchies*. Oxford Logic Guides, 1984.
- [8] Saharon Shelah. Primitive recursive bounds for van der Waerden numbers. *Journal of the American Mathematical Society*, 1:683–697, 1988.
- [9] Robert Soare. *Recursively Enumerable Sets and Degrees*. Springer, 1986.
- [10] Martin Ziegler. *Mengenlehre, Vorlesungsskript*. <http://home.mathematik.uni-freiburg.de/ziegler>. Universität Freiburg, 1996.