

Theoretische Informatik II

Einheit 5

Theorie der Berechenbarkeit



1. Turing-Berechenbarkeit
2. Rekursive Funktionen
3. Funktionale und logische Programme
4. Elementare Berechenbarkeitstheorie
5. Unlösbare Probleme

KERNFRAGEN ZUR BERECHENBARKEIT

- **Welche Berechnungsmethoden sind denkbar?**

- Es gibt weit mehr Modelle als nur die Standard PC Architektur
Lisp Maschinen, Parallelrechner, Neuronale Netze, (Quantencomputer)
- Sind die Modelle miteinander vergleichbar?

- **Welche allgemeingültigen Zusammenhänge gibt es?**

- Eigenschaften, die nicht vom Berechnungsmodell abhängen?
- Beweismethoden wie Abschlußeigenschaften und Problemtransformation

- **Gibt es Grenzen für den Einsatz von Computern?**

- Funktionen, die prinzipiell nicht berechenbar sind?
- Eigenschaften, die unentscheidbar sind?
- Sprachen, die nicht vollständig aufgezählt werden können?

Mit welchen Techniken kann man dies beweisen?

ES GIBT VIELE MODELLE FÜR BERECHENBARKEIT ... SCHON LANGE VOR DEN ERSTEN COMPUTERN

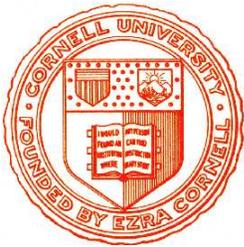
- **Turingmaschine*** (Rechnen mit Papier und Bleistift)
- **Nichtdeterministische Turingmaschine*** (Parallelismus/Quantenrechner)
- **μ -rekursive Funktionen*** (Mathematisches Rechnen)
- **λ -Kalkül*** (Funktionale Sprachen, LISP)
- **Logische Repräsentierbarkeit*** (Logikprogrammierung, PROLOG)
- **Markov-Algorithmen (Typ-0 Grammatiken)** (Regelbasierte Sprachen)
- **Abakus** (Das älteste mechanische Hilfsmittel)
- **JAVA-reduziert** (Imperative höhere Sprachen)
- **Registermaschine** (Assembler-/Maschinenprogrammierung)

Viele Formalisierungen eines intuitiven Begriffes

Theoretische Informatik II

Einheit 5.1

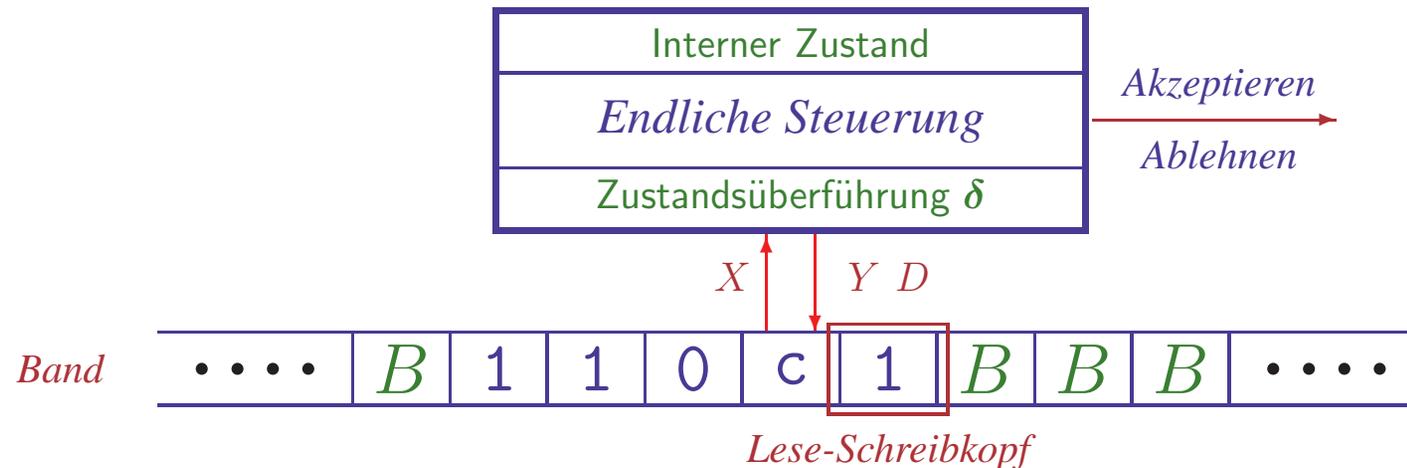
Turing-Berechenbarkeit



1. Rückblick: Turingmaschinen und Sprachen
2. Turing-berechenbare Funktionen
3. Berechnen vs. Akzeptieren

RÜCKBLICK: TURINGMASCHINEN

DAS EINFACHSTE IMPERATIVE COMPUTERMODELL



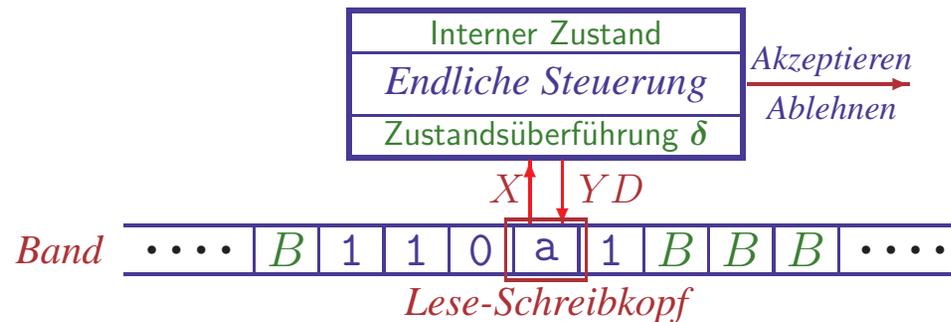
- **Endlicher Automat + lineares Band**

- Endliche Steuerung liest Bandsymbol unter **Lese-Schreibkopf**
- Keine separate Eingabe: Eingabewort steht zu Anfang auf Band

- **Einfacher Verarbeitungsmechanismus**

- Bandsymbol X wird gelesen
- Interner Zustand q wird zu q' verändert
- Neues Symbol Y wird auf das Band geschrieben
- Kopf wird in eine Richtung D (rechts oder links) bewegt

RÜCKBLICK: TURINGMASCHINEN MATHEMATISCH



Deterministische **Turingmaschine**: 7-Tupel $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$

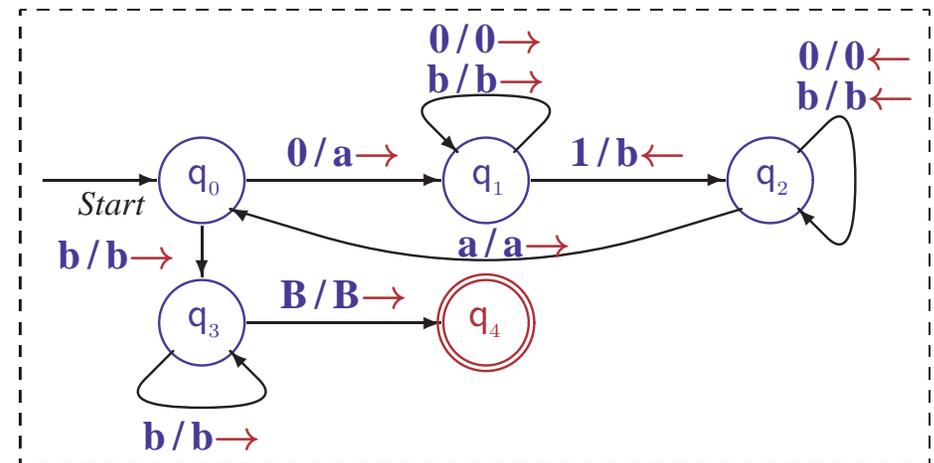
- Q nichtleere endliche **Zustandsmenge**
- Σ endliches **Eingabealphabet**
- $\Gamma \supseteq \Sigma$ endliches **Bandalphabet**
- $\delta: Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$ (partielle) **Überföhrungsfunktion**
- $q_0 \in Q$ **Startzustand**
- $B \in \Gamma \setminus \Sigma$ **Leersymbol des Bands** (“blank”)
- $F \subseteq Q$ Menge von **akzeptierenden** (End-) **Zuständen**

NTM analog mit mengenwertigem $\delta: Q \times \Gamma \rightarrow \mathcal{P}_e(Q \times \Gamma \times \{L, R\})$

RÜCKBLICK: BESCHREIBUNG VON TURINGMASCHINEN

● Übergangsdiagramme

- Zustände durch **Knoten** dargestellt
- q_0 markiert durch *Start*-Pfeil, Endzustände durch **doppelte Kreise**
- Für $\delta(q, X) = (p, Y, D)$ hat das Diagramm eine **Kante** $q \xrightarrow{X/YD} p$
- Σ und Γ oft implizit durch Diagramm bestimmt, Leersymbol heißt B



● Übergangstabellen

- Funktionstabelle für δ
- $—$ heißt “ δ nicht definiert”
- Pfeil \rightarrow kennzeichnet q_0
- Stern $*$ kennzeichnet F
- Σ , Γ und B oft implizit bestimmt

| $Q \setminus \Gamma$ | 0 | 1 | a | b | B |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\rightarrow q_0$ | (q_1, a, R) | — | — | (q_3, b, R) | — |
| q_1 | $(q_1, 0, R)$ | (q_2, b, L) | — | (q_1, b, R) | — |
| q_2 | $(q_2, 0, L)$ | — | (q_0, a, R) | (q_2, b, L) | — |
| q_3 | — | — | — | (q_3, b, R) | (q_4, B, R) |
| $* q_4$ | — | — | — | — | — |

● Konvention: $\delta(q, X)$ undefiniert für Endzustände $q \in F$

- Turingmaschine hält an, wenn $\delta(q, X)$ undefiniert ist

RÜCKBLICK: ARBEITSWEISE VON TURINGMASCHINEN

- **Konfiguration** $\hat{=}$ **Zustand** + **Bandinhalt** + **Kopfposition**

- Formal dargestellt als Tripel $K = (u, q, v) \in \Gamma^* \times Q \times \Gamma^+$

- u, v : String links/rechts vom Kopf q Zustand

- Nur der bereits ‘besuchte’ Teil des Bandes wird betrachtet

- Blanks am Anfang von u oder am Ende von v entfallen, wo möglich

Achtung: im Buch wird das Tripel als ein (!) String uqv geschrieben

- **Konfigurationsübergangsrelation** \vdash^*

- $(uZ, q, Xv) \vdash (u, p, ZYv)$, falls $\delta(q, X) = (p, Y, L)$

- $(u, q, Xv) \vdash (uY, p, v)$, falls $\delta(q, X) = (p, Y, R)$

Sonderfälle für Verhalten am Bandende

- $(\epsilon, q, Xv) \vdash (\epsilon, p, BYv)$, falls $\delta(q, X) = (p, Y, L)$

- $(uZ, q, X) \vdash (u, p, Z)$, falls $\delta(q, X) = (p, B, L)$

- $(u, q, X) \vdash (uY, p, B)$, falls $\delta(q, X) = (p, Y, R)$

- $(\epsilon, q, Xv) \vdash (\epsilon, p, v)$, falls $\delta(q, X) = (p, B, R)$

$K_1 \vdash^* K_2$, falls $K_1 = K_2$ oder es gibt ein K mit $K_1 \vdash K$ und $K \vdash^* K_2$

Definition analog für nichtdeterministische Maschinen

RÜCKBLICK: SPRACHE EINER TURINGMASCHINE

- **Akzeptierte Sprache**

- Menge der Eingaben, für die \vdash^* zu akzeptierendem Zustand führt

$$L(M) = \{w \in \Sigma^* \mid \exists p \in F. \exists u, v \in \Gamma^*. (\epsilon, q_0, w) \vdash^* (u, p, v)\}$$

- Bei Einhalten der Konvention hält M im akzeptierenden Zustand an

Definition identisch für nichtdeterministische Maschinen

DTMs akzeptieren dieselben Sprachen wie NTMs (exponentielle Simulation)

- **Semi-entscheidbare Sprache** $\hat{=}$ **Typ-0 Sprache**

- Sprache, die von einer Turingmaschine M akzeptiert wird

- Alternative Bezeichnungen: **(rekursiv) aufzählbare Sprache**

Turing-akzeptierbare Sprache

- **Entscheidbare Sprache** (auch: **rekursive Sprache**)

- Sprache, die von einer Turingmaschine M akzeptiert wird,
die bei jeder Eingabe terminiert

- **Datenregister speichern Werte aus Menge Δ**
 - Simulation durch erweiterte Zustandsmenge $Q' := Q \times \Delta^k$
- **Mehrspur-Maschinen mit k Datenspuren**
 - Simulation durch erweitertes Bandalphabet $\Sigma' := \Sigma^k$
- **Mehrband-Maschinen mit k unabhängigen Bändern**
 - Simulation mit $2k+1$ Spuren: Inhalt, Kopfmarker + Endmarker
- **Unterprogramme**
 - Simulation wie bei Unterprogrammen in Assemblersprachen
- **Beschränkte Modelle für Beweise**
 - Halbseitig unendliches Band kann beidseitiges Band simulieren
 - Binäres Bandalphabet $\Gamma = \{1, B\}$ kann jedes Alphabet codieren
 - 2 Stacks können jede Konfiguration einer Turingmaschine simulieren

Genauso leistungsfähig wie konventionelle Computer

NEU: ZEIT- UND PLATZBEDARF VON TURINGMASCHINEN

- **Rechenzeit** $t_M(w)$

- Anzahl der Konfigurationsübergänge bis M bei Eingabe w anhält

- **Speicherbedarf** $s_M(w)$

- Anzahl der Bandzellen, die M während der Berechnung aufsucht

- **Komplexität: Bedarf relativ zur Größe**

- $T_M(n) = \max\{t_M(w) \mid |w|=n\}$

Maximaler Bedarf relativ zur Länge
eines Eingabewortes (worst-case)

- $S_M(n) = \max\{s_M(w) \mid |w|=n\}$

- Die **Größenordnung** der Funktionen (linear, quadratisch, kubisch,...)
ist **aussagekräftiger** als die genauen Werte

→ Komplexitätstheorie (§6)

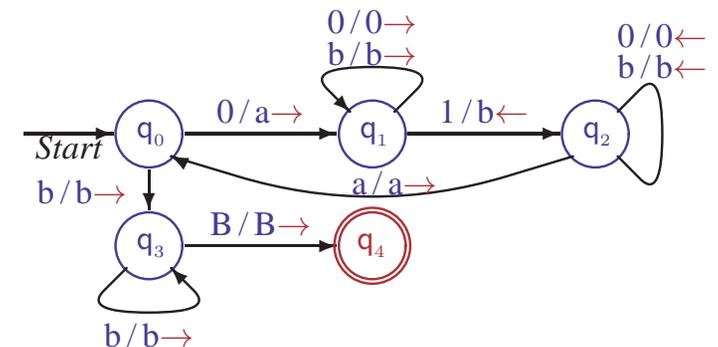
- **Komplexität der Turingmaschine für $\{0^n 1^n \mid n \geq 1\}$**

- Zeitaufwand für Schleife q_0, q_1, q_2, q_0 : $2n$

- Gesamter **Zeitaufwand quadratisch** ($2n^2$)

- Platzbedarf nicht größer als die Eingabe

- **Lineare Speicherplatzkomplexität**



DIE BERECHNETE FUNKTION EINER TURINGMASCHINE

- **Turingmaschinen berechnen Funktionen auf Σ^***
 - Eingabe der Funktion wird aufs Band geschrieben
 - Bandinhalt wird durch Abarbeitung des Programms verändert
 - Wenn Maschine anhält, kann **Bandinhalt ausgegeben** werden
 - Akzeptierende Endzustände werden irrelevant (üblicherweise $F = \emptyset$)

Die ursprünglich vorgesehene Verwendung von Turingmaschinen

- **Formale Beschreibung mittels Konfigurationen** (Gilt für NTM und DTM)
 - Anfangskonfiguration: $\alpha(w) := (\epsilon, q_0, w)$
 - Terminierung: $M \downarrow \kappa := \exists u, v, q, X. \kappa = (u, q, Xv) \wedge \delta(q, X) \text{ undefiniert}$
 - Rechenzeit: $t_M(w) := \min\{j \mid \alpha(w) \vdash^j \kappa \wedge M \downarrow \kappa\}$
Undefiniert falls dieses Minimum nicht existiert, d.h. M hält nicht auf w
 - Ausgabefunktion: $\omega(u, q, v) := v|_{\Sigma}$ (längster Präfix von v , der zu Σ^* gehört)
Ausgabe beginnt unter dem Kopf bis ein Symbol nicht aus Σ erreicht wird
 - Berechnete Funktion: $f_M(w) := \{\omega(\kappa) \mid \exists i \leq t_M(w). \alpha(w) \vdash^i \kappa \wedge M \downarrow \kappa\}$
Für DTMs ist $f_M(w) = \omega(\kappa)$ für das eindeutig bestimmte κ mit $\alpha(w) \vdash^{t_M(w)} \kappa$
Undefiniert, wenn $t_M(w)$ undefiniert, also wenn M auf w nicht hält

BERECHNUNG MIT TURING-MASCHINEN AM BEISPIEL

- $M_1 = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{1\}, \{1, B\}, \delta, q_0, B, \{\})$ mit

| δ_1 | 1 | B |
|-------------------|---------------|---------------|
| $\rightarrow q_0$ | $(q_0, 1, R)$ | $(q_1, 1, L)$ |
| q_1 | $(q_1, 1, L)$ | (q_2, B, R) |
| q_2 | — | — |

Abarbeitungsbeispiel: $(\epsilon, q_0, 111) \vdash^8 (\epsilon, q_2, 1111)$

Fügt am Ende eines Wortes $w \in \{1\}^*$ eine 1 an (“Bierdeckelmaschine”)

- **Mathematische Analyse:**

- Anfangskonfiguration: $\alpha(1^n) = (\epsilon, q_0, 1^n)$
- Nachfolgekongfigurationen: $\alpha(1^n) \vdash (1, q_0, 1^{n-1}) \vdash^{n-1} (1^n, q_0, B)$
 $\vdash (1^{n-1}, q_1, 11) \vdash^n (\epsilon, q_1, B1^{n+1}) \vdash (\epsilon, q_2, 1^{n+1})$
- Terminierung: $\max\{j \mid \alpha(w) \vdash^j (u, q, Xv) \wedge \delta(q, X) \text{ undefiniert}\}$
 $= 2n + 2$
- Ergebnis: $\alpha(1^n) \vdash^{2n+2} (\epsilon, q_2, 1^{n+1})$
- Ausgabefunktion: $\omega(\epsilon, q_2, 1^{n+1}) = 1^{n+1}$

$f_{M_1}(1^n) = 1^{n+1}$ für alle n , Definitionsbereich $\{1\}^*$, Wertebereich $\{1\}^+$

BEISPIELE FÜR TURING-MASCHINEN

- $M_2 = (\{q_0, q_1\}, \{1\}, \{1, B\}, \delta_2, q_0, B, \{\})$

mit

| δ_2 | 1 | B |
|-------------------|---------------|---------------|
| $\rightarrow q_0$ | (q_0, B, R) | (q_1, B, L) |
| q_1 | — | — |

Abarbeitungsbeispiel:

$$(\epsilon, q_0, 111) \vdash^4 (\epsilon, q_1, B)$$

Löscht ein Wort vom Band: $f_{M_2}(w) = \epsilon$ für alle $w \in \{1\}^*$

- $M_3 = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{1\}, \{1, B\}, \delta_3, q_0, B, \{\})$

mit

| δ_3 | 1 | B |
|-------------------|---------------|---------------|
| $\rightarrow q_0$ | $(q_1, 1, R)$ | (q_2, B, R) |
| q_1 | $(q_0, 1, R)$ | (q_1, B, R) |
| q_2 | — | — |

Abarbeitungsbeispiele:

$$(\epsilon, q_0, 1111) \vdash^5 (1111B, q_2, B)$$

$$(\epsilon, q_0, 111) \vdash^n (111BBB\dots BB, q_1, B)$$

Testet, ob Anzahl der Einsen in $w \in \{1\}^*$ gerade ist

$$f_{M_3}(1^n) = \begin{cases} \epsilon & \text{falls } n \text{ gerade,} \\ \perp & \text{sonst} \end{cases} \quad (\perp \text{ steht für "undefiniert"})$$

BEISPIELE FÜR TURING-MASCHINEN II

- $M_4 = (\{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4\}, \{1\}, \{1, B\}, \delta_4, q_0, B, \{\})$

mit

| δ_4 | 1 | B |
|-------------------|---------------|---------------|
| $\rightarrow q_0$ | $(q_0, 1, R)$ | (q_1, B, L) |
| q_1 | (q_2, B, R) | (q_4, B, R) |
| q_2 | $(q_2, 1, R)$ | $(q_3, 1, L)$ |
| q_3 | $(q_3, 1, L)$ | $(q_1, 1, L)$ |
| q_4 | — | — |

Abarbeitungsbeispiel:

$$(\epsilon, q_0, 11) \vdash^{14} (\epsilon, q_4, 1111)$$

Verdoppelt Anzahl der Einsen: $f_{M_4}(1^n) = 1^{2n}$

- $M_5 = (\{q_0, q_1, q_2, q_3\}, \{0, 1\}, \{0, 1, B\}, \delta_5, q_0, B, \{3\})$

mit

| δ_5 | 0 | 1 | B |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| $\rightarrow q_0$ | $(q_0, 0, R)$ | $(q_0, 1, R)$ | (q_1, B, L) |
| q_1 | $(q_2, 1, L)$ | $(q_1, 0, L)$ | $(q_2, 1, L)$ |
| q_2 | $(q_2, 0, L)$ | $(q_2, 1, L)$ | (q_3, B, R) |
| q_3 | — | — | — |

Abarbeitungsbeispiel:

$$(\epsilon, q_0, 10011) \vdash^{12} (\epsilon, q_3, 10100)$$

Addiert 1 auf die Binärdarstellung einer natürlichen Zahl

TURING-BERECHENBARE FUNKTIONEN

- $f: \Sigma^* \rightarrow \Delta^*$ **Turing-berechenbar**

– $f = f_M$ für eine Turingmaschine $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$ mit $\Delta \subseteq \Gamma$

\mathcal{T} : Menge der Turing-berechenbaren Funktionen

- **Berechenbarkeit auf Zahlen:** $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$

$\hat{=}$ Berechenbarkeit der Funktion $f_r: \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ mit $f_r(w) = r(f(r^{-1}(w)))$

wobei $r: \mathbb{N} \rightarrow \Sigma^*$ **injektive Repräsentation** von Zahlen durch Wörter

· **unäre Darstellung** $r_u: \mathbb{N} \rightarrow \{1\}^*$ mit $r_u(n) = 1^n$

· **binäre Codierung** $r_b: \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}^*$ (ohne führende Nullen)

f wird berechnet durch $f(x) = r^{-1}(f_r(r(x)))$

Berechenbarkeit auf anderen Mengen analog

- **Nachfolgerfunktion** $s:\mathbb{N}\rightarrow\mathbb{N}$ mit $s(n) = n+1$
 - Bei unärer Codierung: berechne $s_u:\{1\}^*\rightarrow\{1\}^*$ mit $s_u(1^n) = 1^{n+1}$
 - Turingmaschine muß eine 1 anhängen: $s_u = f_{M_1}$
 - Bei binärer Codierung: $s_b = f_{M_5}$
 - M muß Ziffern von rechts beginnend umwandeln, ggf. mit Übertrag
- **Division durch 2:** $div_2:\mathbb{N}\rightarrow\mathbb{N}$ mit $div_2(n) = \lfloor n/2 \rfloor$
 - Bei unärer Codierung: M muß (analog zu M_4) je zwei Einsen löschen und eine neue hinter dem Ende des Wortes schreiben
 - Bei binärer Codierung: M muß nur die letzte Ziffer löschen

**Komplexere arithmetische Operationen benötigen
Programmiertechniken für Turingmaschinen**

AKZEPTIEREN ODER BERECHNEN?

- **Jede Funktion ist als Menge beschreibbar**

- $\mathbf{graph}(f) = \{(x, y) \mid f(x) = y\}$

Akzeptierende Maschinen erkennen Graphen berechenbarer Funktionen

f berechenbar $\Leftrightarrow \mathbf{graph}(f)$ semi-entscheidbar \mapsto nächste Folie

- **Jede Menge ist als Funktion beschreibbar**

- $\chi_L(w) = \begin{cases} 1 & \text{falls } w \in L, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ Charakteristische Funktion der Sprache L

- $\psi_L(w) = \begin{cases} 1 & \text{falls } w \in L, \\ \perp & \text{sonst} \end{cases}$ Partiiell-charakteristische Funktion von L

Charakteristische Funktionen erkannter Sprachen sind berechenbar

L semi-entscheidbar $\Leftrightarrow \psi_L$ berechenbar

L entscheidbar $\Leftrightarrow \chi_L$ berechenbar \mapsto nächste Folie

Simuliere Abarbeitung der jeweils anderen Maschine

- **f berechenbar $\Leftrightarrow \text{graph}(f)$ semi-entscheidbar**

\Rightarrow : Bei Eingabe (w, v) “teste” ob $f(w) = v$ ergibt

\Leftarrow : Bei Eingabe w suche das “erste” Wort v mit $(w, v) \in \text{graph}(f)$

Suche muß Werte für w, v und Rechenzeitgrenze simultan durchlaufen !!

In der Literatur wird diese algorithmische Methode oft **dovetailing** genannt

Maschinen müssen nicht bei jeder Eingabe anhalten

- **L semi-entscheidbar $\Leftrightarrow \psi_L$ berechenbar**

\Rightarrow : Bei Eingabe w “teste” ob w akzeptiert wird und gebe ggf. 1 aus

\Leftarrow : Bei Eingabe w “teste” ob $\psi_L(w) = 1$ ergibt

Maschinen müssen nicht bei jeder Eingabe anhalten

- **L entscheidbar $\Leftrightarrow \chi_L$ berechenbar**

– Wie oben, aber beide Maschinen müssen bei jeder Eingabe anhalten

TURINGMASCHINEN IM RÜCKBLICK

- **Allgemeinstes Automatenmodell**

- Deterministischer endlicher Automat mit unendlichem Speicherband
- “Beliebiger” Zugriff auf Speicherzellen
- Erkennung von Wörtern durch Endzustand
- Berechnen von Werten durch Ausgabe nach Terminierung
- Beide Modelle sind gleich mächtig

- **Nichtdeterministische Variante ist gleich stark**

- Simulationsaufwand durch deterministische Maschine ist exponentiell
- NTM hilfreich für Nachweis der Äquivalenz zu Typ-0 Grammatiken

- **Äquivalent zu realen Computern**

- Register, mehrere Bänder, Unterprogramme, etc. simulierbar

Standardmodell für Untersuchung von Berechenbarkeit