

Theoretische Grundlagen der Informatik

Vorlesung am 13. November 2018

INSTITUT FÜR THEORETISCHE INFORMATIK



(deterministische) Turing-Maschine

- Bestandteile:
 - Lese-/Schreibkopf _____ liest / schreibt Zeichen auf Band
 - endliche Kontrolle _____ stets in einem Zustand
 - unendliches Rechenband _____ enthält Eingabe
- formal: $\mathcal{M} = (Q, \Sigma, \sqcup, \Gamma \supseteq (\Sigma \cup \{\sqcup\}), s \in Q, \delta, F \subseteq Q)$
- Übergangsfunktion: $\delta(q, a) = (q', a', X \in \{L, N, R\})$

(deterministische) Turing-Maschine

■ Bestandteile:

- Lese-/Schreibkopf _____ liest / schreibt Zeichen auf Band
 - endliche Kontrolle _____ stets in einem Zustand
 - unendliches Rechenband _____ enthält Eingabe
- formal: $\mathcal{M} = (Q, \Sigma, \sqcup, \Gamma \supseteq (\Sigma \cup \{\sqcup\}), s \in Q, \delta, F \subseteq Q)$
- Übergangsfunktion: $\delta(q, a) = (q', a', X \in \{L, N, R\})$

Bei der Bearbeitung einer Eingabe w gibt es **drei Möglichkeiten**:

\mathcal{M} "läuft" in einen
Zustand in F .

$\rightsquigarrow \mathcal{M}$ akzeptiert w

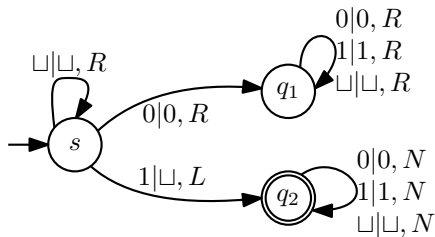
\mathcal{M} "läuft" in einen
Übergang
 $\delta(q, a) = (q, a, N)$.

$\rightsquigarrow \mathcal{M}$ lehnt w ab

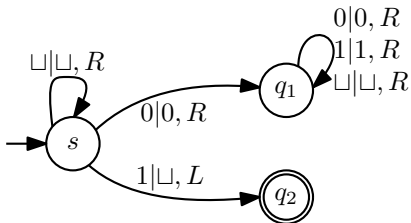
\mathcal{M} "läuft"
unendlich lange.

$\rightsquigarrow \mathcal{M}$ stoppt nicht

Beispiel-Turing-Maschine

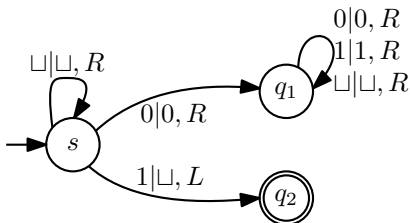


- Die TM akzeptiert, falls die Eingabe mit Eins beginnt.

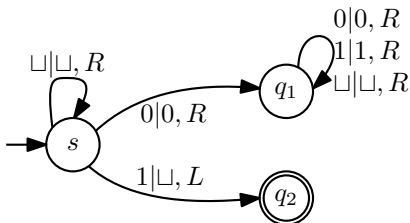


- Die TM akzeptiert, falls die Eingabe mit Eins beginnt.

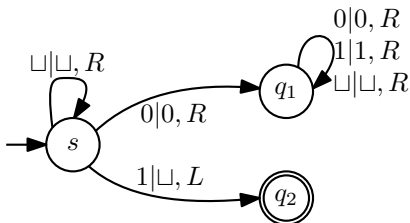
Beispiel-Turing-Maschine



- Die TM akzeptiert, falls die Eingabe mit Eins beginnt.
- Die TM stoppt nicht, falls die Eingabe nicht mit Eins beginnt.



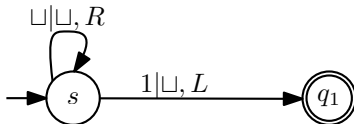
- Eine Turing-Maschine erkennt nicht nur eine Sprache,
- sondern sie verändert auch die Eingabe, und
- hat insofern auch eine Ausgabe
(= Inhalt des Bandes nach der akzeptierenden Bearbeitung).
- Die Turing-Maschine realisiert also eine partielle Funktion $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$.



- Die Turing-Maschine realisiert also eine partielle Funktion $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$.
- Im Beispiel ist

$$f(w) = \begin{cases} v & \text{falls } w = 1v \\ \text{undefiniert} & \text{sonst} \end{cases}$$

- Oft werden wir die Turing-Maschine beziehungsweise deren Übergangsfunktion nur unvollständig beschreiben.
- Beispiel:



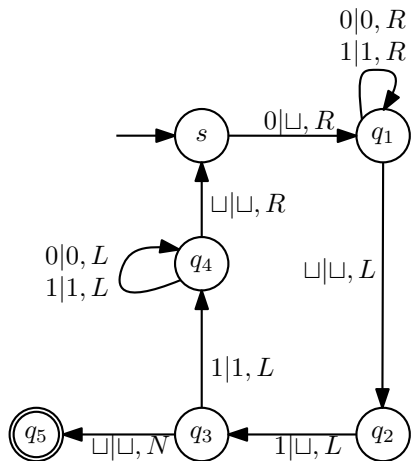
- Eine Vervollständigung ist immer möglich.
- Wenn für eine bestimmte Kombination q, a kein Übergang $\delta(q, a)$ definiert ist, dann stoppt die Turing-Maschine im Zustand q .
(z.B. setze $\delta(q, a) := (q, a, N)$)

- Eine Turing-Maschine **akzeptiert** eine Eingabe $w \in \Sigma^*$, wenn sie nach Lesen von w in einem Zustand aus F stoppt.
- Sie **akzeptiert** eine Sprache L genau dann, wenn sie ausschließlich Wörter $w \in L$ als Eingabe akzeptiert.
- Eine Sprache $L \subseteq \Sigma^*$ heißt **rekursiv** oder **entscheidbar**, wenn es eine Turing-Maschine gibt, **die auf allen Eingaben stoppt** und eine Eingabe w genau dann akzeptiert, wenn $w \in L$ gilt.
- Eine Sprache $L \subseteq \Sigma^*$ heißt **rekursiv-aufzählbar** oder **semi-entscheidbar**, wenn es eine Turing-Maschine gibt, die genau die Eingaben w akzeptiert für die $w \in L$.

Das Verhalten der Turing-Maschine für Eingaben $w \notin L$ ist damit nicht genau definiert. D.h., die Turing-Maschine stoppt entweder nicht in einem Endzustand oder aber stoppt gar nicht.

- Situation in der sich eine TM $\mathcal{M} := (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, F)$ befindet, wird durch die Angabe der **Konfiguration** kodiert.
- Eine Konfiguration hat die Form $w(q)av$, wobei
 - $w, v \in \Gamma^*$
 - $a \in \Gamma$
 - $q \in Q$
- Bedeutung:
 - \mathcal{M} befindet sich gerade im Zustand q .
 - Der Lese-/Schreibkopf steht auf dem Zeichen a .
 - Links vom Lese-/Schreibkopf steht das Wort w auf dem Rechenband.
 - Rechts vom Lese-/Schreibkopf steht das Wort v auf dem Rechenband.

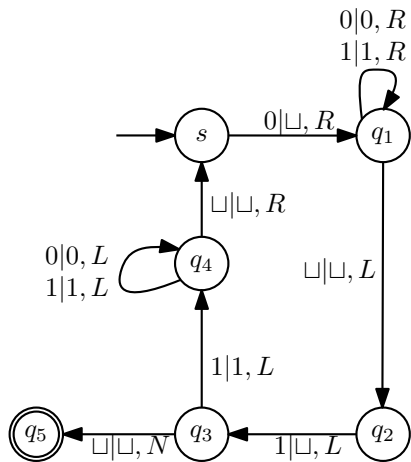
Beispiel: Konfiguration



TM akzeptiert $\{0^n 1^n : n \geq 1\}$.

Beispiel: Eingabe $w = 0011$

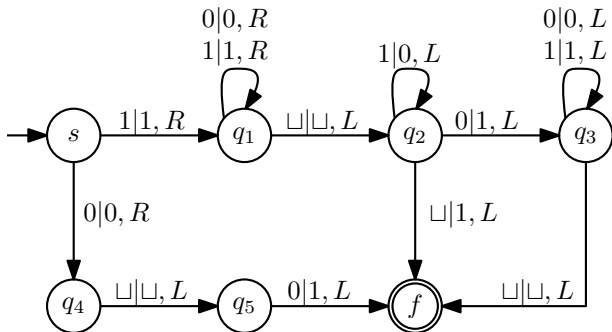
Beispiel: Konfiguration



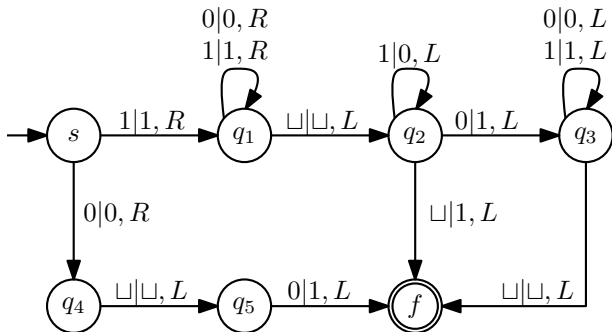
(s)0011
 $\sqcup(q_1)011$
 0(q_1)11
 01(q_1)1
 011(q_1) \sqcup
 01(q_2)1
 0(q_3)1 \sqcup
 (q_4)01
 (q_4) \sqcup 01
 \sqcup (s)01
 $\sqcup(q_1)$ 1
 1(q_1) \sqcup
 (q_2)1
 (q_3) \sqcup
 (q_5) \sqcup

- Eine Funktion $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$ heißt **(Turing-)berechenbar** oder **totalrekursiv**, wenn es eine Turing-Maschine gibt, die bei Eingabe von $w \in \Sigma^*$ genau dann akzeptiert wenn $f(w)$ nicht undefiniert ist und in diesem Fall den Funktionswert $f(w) \in \Gamma^*$ ausgibt.
- Eine Turing-Maschine **realisiert** eine Funktion $f: \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$, falls gilt:

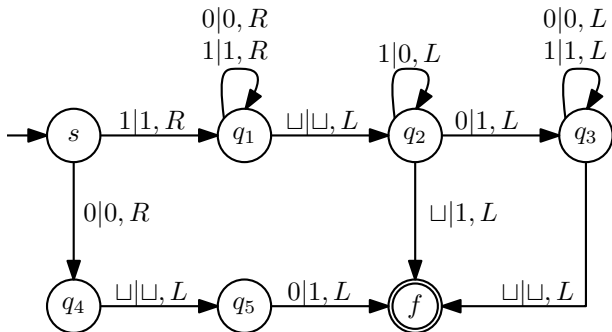
$$f(w) = \begin{cases} \text{Ausgabe der Turing-Maschine,} \\ \quad \text{wenn sie bei Eingabe } w \text{ akzeptiert.} \\ \text{undefiniert,} \\ \quad \text{sonst.} \end{cases}$$



- Fasse die Eingabe w als binäre Zahl auf.
- Es sollen nur Eingaben ohne führende Nullen und die Null selbst akzeptiert werden.
- Addiere zur Eingabe $w \in (0 \cup 1)^*$ eine Eins.

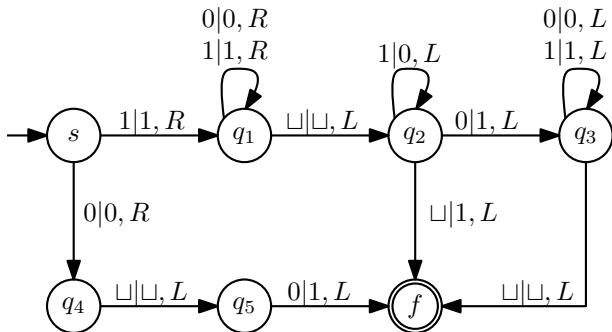


$$\text{Es gilt: } f(w) = \begin{cases} w + 1 & \text{falls } w \in 0 \cup 1(0 \cup 1)^*, \\ & w \text{ interpretiert als Binärzahl} \\ \text{undefiniert} & \text{sonst} \end{cases}$$



Dabei sind die Zustände jeweils für die folgenden Aufgaben verantwortlich:

- q_1 Bewegung des Lese-/Schreibkopfes nach rechts bis zum Eingabeende,
- q_2 Bildung des Übertrages, der durch die Addition von Eins zu einer bereits vorhandenen Eins entsteht,



Dabei sind die Zustände jeweils für die folgenden Aufgaben verantwortlich:

- q_3 Bewegung des Lese-/Schreibkopfes nach links, nachdem die Aufsummierung abgeschlossen ist (kein Übertrag mehr),
- q_4, q_5 Sonderbehandlung für den Fall der Eingabe 0, und
- f Endzustand.

Entscheidbarkeit von Sprachen und Berechenbarkeit von Funktionen sind verwandt:

- Eine Turing-Maschine akzeptiert eine Sprache L , wenn sie genau auf den Eingaben $w \in L$ in einem ausgezeichneten Endzustand stoppt.
- L ist entscheidbar, wenn es eine Turing-Maschine gibt, die auf allen Eingaben stoppt und L akzeptiert.
- Die Funktion f heißt berechenbar, wenn eine Turing-Maschine existiert, die f realisiert.

Entscheidbarkeit von Sprachen und Berechenbarkeit von Funktionen sind verwandt:

- Man kann eine Turing-Maschine \mathcal{M} , die auf allen Eingaben stoppt, so modifizieren, dass es zwei ausgezeichnete Zustände q_J und q_N gibt und dass die modifizierte Turing-Maschine $\tilde{\mathcal{M}}$ stets in einem der Zustände q_J oder q_N hält und akzeptiert.
- Dabei stoppt $\tilde{\mathcal{M}}$ bei der Eingabe w genau dann in q_J , wenn \mathcal{M} das Wort w akzeptiert, ansonsten stoppt $\tilde{\mathcal{M}}$ in q_N .
- Damit ist die Sprache L genau dann entscheidbar, wenn es eine Turing-Maschine gibt, die immer in einem der Zustände $\{q_J, q_N\}$ stoppt, wobei sie gerade für $w \in L$ in q_J hält.

Entscheidbarkeit von Sprachen und Berechenbarkeit von Funktionen sind verwandt:

- Man kann eine Turing-Maschine \mathcal{M} , die auf allen Eingaben stoppt, so modifizieren, dass es zwei ausgezeichnete Zustände q_J und q_N gibt und dass die modifizierte Turing-Maschine $\tilde{\mathcal{M}}$ stets in einem der Zustände q_J oder q_N hält und akzeptiert.
- Dabei stoppt $\tilde{\mathcal{M}}$ bei der Eingabe w genau dann in q_J , wenn \mathcal{M} das Wort w akzeptiert, ansonsten stoppt $\tilde{\mathcal{M}}$ in q_N .

Testen Sie sich: Finden Sie diese Modifikation $\tilde{\mathcal{M}}$ von \mathcal{M} ?

- Damit ist die Sprache L genau dann entscheidbar, wenn es eine Turing-Maschine gibt, die immer in einem der Zustände $\{q_J, q_N\}$ stoppt, wobei sie gerade für $w \in L$ in q_J hält.

- Eine Sprache $L \subseteq \Sigma^*$ ist **entscheidbar** genau dann, wenn ihre **charakteristische Funktion** χ_L berechenbar ist, wobei gilt:

$$\chi_L: \Sigma^* \rightarrow \{0, 1\} \quad \text{mit} \quad \chi_L(w) = \begin{cases} 1 & \text{falls } w \in L \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- Eine Sprache L ist **semi-entscheidbar** genau dann, wenn die partielle Funktion χ_L^* berechenbar ist, wobei gilt:

$$\chi_L^*(w) = \begin{cases} 1 & \text{falls } w \in L \\ \text{undefiniert} & \text{sonst} \end{cases}$$

Church'sche These

Die Menge der (Turing-)berechenbaren Funktionen ist genau die Menge der im intuitiven Sinne überhaupt berechenbaren Funktionen.

Church'sche These

Die Menge der (Turing-)berechenbaren Funktionen ist genau die Menge der im intuitiven Sinne überhaupt berechenbaren Funktionen.

Interpretation

- Turing-Maschinen sind formale Modelle für Algorithmen.
- Kein Berechnungsverfahren kann algorithmisch genannt werden, wenn es nicht von einer Turing-Maschine ausführbar ist.

Bemerkung

- The Church'sche These ist ohne eine präzise Definition von *intuitiv berechenbar* nicht beweisbar.
- Sie ist aber in der Informatik allgemein akzeptiert.

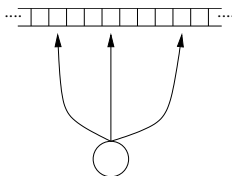
Church'sche These

Die Menge der (Turing-)berechenbaren Funktionen ist genau die Menge der im intuitiven Sinne überhaupt berechenbaren Funktionen.

Begründung

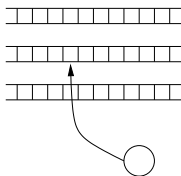
- Es existieren keine Beispiele von Funktionen, die als intuitiv berechenbar angesehen werden, aber nicht Turing-berechenbar sind.
- Alle Versuche, realistische Modelle aufzustellen, die mächtiger sind als Turing-Maschinen, schlugen fehl.
- Eine Reihe von völlig andersartigen Ansätzen, den Begriff der Berechenbarkeit formal zu fassen, wie zum Beispiel die Registermaschine, haben sich als äquivalent erwiesen.

Mehrere Lese-/Schreibköpfe



- Mehrere Lese-/Schreibköpfe ($n \in \mathbb{N}$) greifen auf das eine Eingabeband zu und werden von der endlichen Kontrolle gesteuert.
- Die Übergangsfunktion ist dann vom Typ $\delta: Q \times \Gamma^n \rightarrow Q \times \Gamma^n \times \{L, N, R\}^n$.
- Die Zustände $q \in Q$ kann man als n -Tupel auffassen.
- Es ist nötig eine Prioritätenregel für die einzelnen Köpfe anzugeben, falls mehrere auf einem Feld des Eingabebandes stehen.

Mehrere Bänder



- Ein Lese-/Schreibkopf kann auf mehrere Eingabebänder ($n \in \mathbb{N}$) zugreifen.
- Die Übergangsfunktion ist dann vom Typ

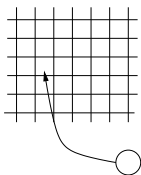
$$\delta: Q \times \Gamma \times \{1, \dots, n\} \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, N, R\} \times \{1, \dots, n\}.$$

Mehrere Lese-/Schreibköpfe für mehrere Bänder

- Wir haben jetzt m Bänder und n Lese-/Schreibköpfe.
- Die Übergangsfunktion ist dann vom Typ

$$\delta: Q \times \Gamma^n \times \{1, \dots, m\}^n \rightarrow Q \times \Gamma^n \times \{L, N, R\}^n \times \{1, \dots, m\}^n.$$

Mehrdimensionale Bänder



- Das Eingabeband ist nun mehrdimensional und hat hier im Beispiel die Dimension zwei.
- Wir sprechen dann von einem Arbeitsfeld.
- Dabei ist

$$\delta: Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L(eft), U(p), R(ight), D(own), N(othing)\}$$

Bemerkungen

- Fragestellungen der Art:
 - Wann stoppt eine Mehrkopf-Maschine?
 - Welcher Kopf ‚gewinnt‘, wenn mehrere Köpfe (verschiedene) Symbole an dieselbe Stelle schreiben wollen?müssen bei solchen Modifikationen noch geklärt werden.
- Es hat sich allerdings gezeigt, dass keine dieser Erweiterungen mehr leistet, als eine normale Turing-Maschine.
- **Alle angegebenen Modifikationen können durch eine normale 1-Band Turing-Maschine simuliert werden.**

Ziel

- Bisher: Nur Turing-Maschinen, die eine bestimmte Aufgabe erfüllen.
- Jetzt: Konstruktion einer Turing-Maschine, die als Eingabe
 - ein Programm und
 - eine spezielle Eingabeerhält.
- Die Aufgabe besteht darin, das gegebene Programm auf der gegebenen speziellen Eingabe auszuführen.

Wir betrachten dazu eine normierte Turing-Maschine, d.h.

- $Q := \{q_1, \dots, q_n\}$
 - $\Sigma := \{a_1, \dots, a_k\}$
 - $\Gamma := \{\sqcup, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_l\}$
 - $s := q_1$
 - $F := \{q_2\}$
-
- Dies bedeutet keine Einschränkung in der Mächtigkeit der Turing-Maschinen:
 - Jede beliebige Turing-Maschine kann durch eine derart normierte Turing-Maschine der obigen Form simuliert werden.
 - Jede normierte Turing-Maschine \mathcal{M} lässt sich eindeutig als Wort aus $(0 \cup 1)^*$ kodieren.

Sei $\mathcal{M} := (Q, \Sigma, \sqcup, \Gamma, \delta, s, F)$ eine Turing-Maschine.

Die Gödelnummer von \mathcal{M} , bezeichnet als $\langle \mathcal{M} \rangle$, ist definiert durch folgende Kodierungsvorschrift:

- Kodiere

$$\delta(q_i, a_j) = (q_r, a_s, d_t) \text{ durch } 0^i 1 0^j 1 0^r 1 0^s 1 0^t,$$

wobei $d_t \in \{d_1, d_2, d_3\}$ und

- d_1 für L ,
 - d_2 für R und
 - d_3 für N steht.
- Die Turing-Maschine wird dann kodiert durch:

$$111\text{code}_1 11\text{code}_2 11 \dots 11\text{code}_z 111,$$

wobei code_i für $i = 1, \dots, z$ alle Funktionswerte von δ in beliebiger Reihenfolge beschreibt.

- Die eigentlichen Werte der Turing-Maschine werden also (unär) durch Nullen beschrieben und die Einsen dienen als Begrenzung der Eingabewerte.
- Jede Turing-Maschine kann also durch ein Wort aus $(0 \cup 1)^*$ kodiert werden.
- Umgekehrt beschreibt jedes Wort aus $(0 \cup 1)^*$ (höchstens) eine Turing-Maschine.
- Wir vereinbaren, dass ein Wort, das keine Turing-Maschine in diesem Sinne beschreibt, (zum Beispiel ε , 0, 000) eine Turing-Maschine kodiert, die \emptyset akzeptiert.
- Eine *universelle Turing-Maschine* erhält als Eingabe ein Paar $(\langle \mathcal{M} \rangle, w)$, wobei $w \in \{0, 1\}^*$ ist, und sie simuliert \mathcal{M} auf w .

Die Gödelnummer - Beispiel

Sei $\mathcal{M} = (Q = \{q_1, q_2, q_3\}, \Sigma = \{0, 1\}, \sqcup, \Gamma = \{0, 1, \sqcup\}, \delta, q_1, \{q_2\})$, mit

$$\delta(q_1, 1) = (q_3, 0, R)$$

$$\delta(q_3, 0) = (q_1, 1, R)$$

$$\delta(q_3, 1) = (q_2, 0, R)$$

$$\delta(q_3, \sqcup) = (q_3, 1, L)$$

\mathcal{M} zusammen mit der Eingabe 1011 ist dann:

```
111010010001010011000101010010011000
100100101001100010001000100101111011
```

Die Gödelnummer - Beispiel

Sei $\mathcal{M} = (Q = \{q_1, q_2, q_3\}, \Sigma = \{0, 1\}, \sqcup, \Gamma = \{0, 1, \sqcup\}, \delta, q_1, \{q_2\})$, mit

$$\delta(q_1, 1) = (q_3, 0, R)$$

$$\delta(q_3, 0) = (q_1, 1, R)$$

$$\delta(q_3, 1) = (q_2, 0, R)$$

$$\delta(q_3, \sqcup) = (q_3, 1, L)$$

\mathcal{M} zusammen mit der Eingabe **1011** ist dann:

111010010001010011000101010010011000
10010010100110001000100010010111**1011**

Definition

Zu $w \in \{0, 1\}^*$ sei T_w

- die Turing-Maschine mit der Gödelnummer (GN) w , bzw.
- die Turing-Maschine, die \emptyset akzeptiert.

Es sei $L(T_w)$ die Sprache, die von T_w akzeptiert wird.

Wir konstruieren die sogenannte **Diagonalsprache** L_d , wie folgt:

- Betrachte die Wörter aus $\{0, 1\}^*$ in *kanonischer Reihenfolge*, d.h. w_i steht vor w_j ($i < j$), falls
 - $|w_i| < |w_j|$, oder
 - $|w_i| = |w_j|$ und w_i lexikographisch vor w_j steht.
- \mathcal{M}_j sei die TM, die durch die Gödelnummer w_j kodiert ist.
- Wir konstruieren eine unendliche Tabelle,
 - an deren Position (i, j) für $1 \leq i, j < \infty$ eine Null oder eine Eins steht, und
 - welche beinhaltet, ob w_i in $L(\mathcal{M}_j)$ ist.
- Damit gilt für die Einträge

$$(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \mathcal{M}_j \text{ } w_i \text{ akzeptiert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- Damit gilt für die Einträge

$$(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \mathcal{M}_j \text{ } w_i \text{ akzeptiert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- Definiere dazu

$$L_d := \{w_i \mid \mathcal{M}_i \text{ akzeptiert } w_i \text{ nicht}\}.$$

- L_d enthält also alle w_i , für die auf der Diagonalen an der Stelle (i, i) eine Null steht.
- Dies führt später zu einem Diagonalbeweis (Cantor).

Die Diagonalsprache - Veranschaulichung

$w \in \{0, 1\}^*$	Gödelnummer							
	w_i	w_j	w_k					
\vdots	\vdots							
w_i	1	0	1	0	1	0	0	$w_i \in L_d$
w_j	0	0	1	0	0	1	1	$w_j \notin L_d$
w_k	1	0	0	1	1	0	1	$w_k \notin L_d$
\vdots	\vdots							

Satz (Unentscheidbarkeit der Diagonalsprache):
Die Sprache L_d ist nicht entscheidbar.

Satz (Unentscheidbarkeit der Diagonalsprache):
Die Sprache L_d ist nicht entscheidbar.

Beweis:

Wäre L_d entscheidbar, so existierte eine Turing-Maschine \mathcal{M} , die

- (1) stets hält,
- (2) genau die $w \in L_d$ akzeptiert.

Dann ist $\mathcal{M} = \mathcal{M}_i$ für (mindestens) ein i .

Wende nun \mathcal{M}_i auf w_i an:

- Falls $w_i \in L_d$, dann akzeptiert \mathcal{M} das Wort w_i wegen (2).
- Falls $w_i \in L_d$, dann akzeptiert \mathcal{M}_i das Wort w_i nicht,
laut der Definition von L_d .

Zusammen ist dies ein Widerspruch zu $\mathcal{M} = \mathcal{M}_i$.

Korollar

Die Sprache $L_d^c := \{0, 1\}^* \setminus L_d$ ist nicht entscheidbar.

Korollar

Die Sprache $L_d^c := \{0, 1\}^* \setminus L_d$ ist nicht entscheidbar.

Beweis:

- Wäre L_d^c entscheidbar, so existierte eine Turing-Maschine, die L_d^c entscheidet.
- Diese könnte aber leicht zu einer Turing-Maschine modifiziert werden, die L_d entscheidet.
- Dies ist ein Widerspruch zur Unentscheidbarkeit der Diagonalsprache.

Der Barbier von Hintertupfingen rasiert genau die Männer im Dorf, die sich nicht selbst rasieren.

Wer rasiert den Barbier?

Der Barbier von Hintertupfingen rasiert genau die Männer im Dorf, die sich nicht selbst rasieren.

Wer rasiert den Barbier?

Daniel Düsentrieb behauptet, eine allwissende Maschine erfunden zu haben. Man stellt eine Ja/Nein-Frage und die Antwort leuchtet auf. Dagobert Duck kauft die Maschine. Will aber nur bei korrekter Antwort zahlen. Er stellt der Maschine die Frage: Wirst du mit **Nein** antworten?

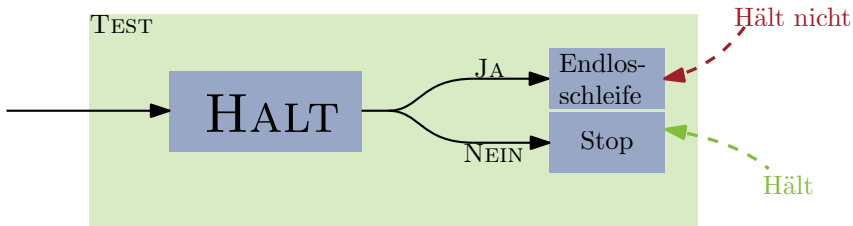
Was passiert?

Halteproblem

Programm HALT:



Programm TEST:

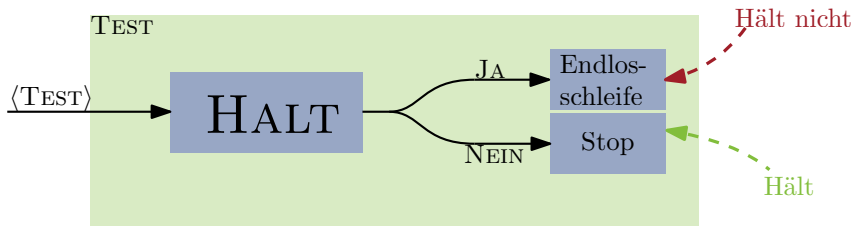


Halteproblem

Programm HALT:



Programm TEST:



Wie verhält sich TEST bei der Eingabe $\langle \text{TEST} \rangle$?

Das **Halteproblem** definiert folgende Sprache

$$\mathcal{H} := \{wv \mid T_w \text{ hält auf der Eingabe } v\}.$$

Satz (Unentscheidbarkeit des Halteproblems):

\mathcal{H} ist nicht entscheidbar.

Interpretation:

- Das Problem, ob eine Turing-Maschine auf einer Eingabe w stoppt, ist nicht entscheidbar.

Satz (Unentscheidbarkeit des Halteproblems):

$\mathcal{H} = \{wv \mid T_w \text{ hält auf der Eingabe } v\}$ ist nicht entscheidbar.

Beweis:

- Angenommen es existiert eine stets haltende Turing-Maschine, die \mathcal{H} entscheidet.
- Wir konstruieren daraus eine stets haltende Turing-Maschine, die L_d^c entscheidet, mit Widerspruch zum letzten Korollar.

Sei w eine Eingabe, für die wir entscheiden wollen, ob $w \in L_d^c$.

Wir können wie folgt vorgehen:

- Berechne das i , so dass $w = w_i$ ist.
- Betrachte die durch w_i kodierte Turing-Maschine \mathcal{M}_i .
- Wende die Turing-Maschine für \mathcal{H} auf $\langle \mathcal{M}_i \rangle \cdot w_i$ an.

Satz (Unentscheidbarkeit des Halteproblems):

$\mathcal{H} = \{wv \mid T_w \text{ hält auf der Eingabe } v\}$ ist nicht entscheidbar.

Sei w eine Eingabe, für die wir entscheiden wollen, ob $w \in L_d^c$.
Wir können wie folgt vorgehen:

- Berechne das i , so dass $w = w_i$ ist.
- Betrachte die durch w_i kodierte Turing-Maschine \mathcal{M}_i .
- Wende die Turing-Maschine für \mathcal{H} auf $\langle \mathcal{M}_i \rangle \cdot w_i$ an.

Wir machen folgende Fallunterscheidung:

- Falls $\langle \mathcal{M}_i \rangle \cdot w_i$ nicht akzeptiert wird, dann hält \mathcal{M}_i nicht auf w_i .
- Nach Definition von \mathcal{H} ist also $w_i \in L_d$ und damit $w_i \notin L_d^c$.
- Falls $\langle \mathcal{M}_i \rangle \cdot w_i$ akzeptiert wird, dann hält \mathcal{M}_i auf w_i .
- Dann können wir auf der universellen Turing-Maschine die Berechnung von \mathcal{M}_i auf w_i simulieren.