

## Entscheidbarkeit

### Nichtentscheidbare Probleme

Welche von denen gehören zu den Semientscheidbaren?

- Diagonalsprache  $L_d := \{\omega_i : M_i \text{ akzeptiert } \omega_i \text{ nicht}\}$
- Kontextfreie Sprachen:  $L(G_1) \subseteq L(G_2)?$ , Mehrdeutigkeit (mehrere Ableitungen zum gleichen Wort)?,  $L(G)$  kontextfrei?,  $L(G)$  regulär?,  $L(G)$  det. kontextfrei?
- Diophantische Gleichungen: multivariates Polynome  $p$ , Koeffizienten ganzzahlig:  $\exists x_1, \dots, x_n \in \mathbb{Z} : p(x_1, \dots, x_n) = 0?$

### Semientscheidbare Probleme

Definition: Es ex. eine TM, die genau die Wörter aus  $L$  akzeptiert, sonst aber nicht halten muss.

Beispiele:

- Halteproblem  $H := \{wv | T_w \text{ hält auf der Eingabe } v\}$
- Universelle Sprache  $L_u := \{wv | v \in L(T_w)\}$
- Postches Korrespondenzproblem Geg: Menge von Wortpaaren  $(x_i, y_i) \in (\Sigma^+ \times \Sigma^+)^*$ . Gibt es eine endl. Folge von Indizes:  $x_{i_1} \dots x_{i_n} = y_{i_1} \dots y_{i_n}?$
- Komplement der Diagonalsprache

### Entscheidbare Probleme

Definition: Es ex. eine TM, die genau die Wörter aus  $L$  akzeptiert und bei jeder Eingabe hält.

Beispiele:

Presburger Arithmetik: eingeschränkte prädikatenlogische Formeln.

Typ	$\in$	$\emptyset$	$=$	$\cap = \emptyset$
CH-3	J	J	J	J
Det. KF	J	J	J	N
CH-2	J	J	N	N
CH-1	J	N	N	N
CH-0	N	N	N	N

$$\mathcal{NP} \stackrel{?}{=} \mathcal{P}$$

### Definitionen $\mathcal{NP}, \mathcal{P}$

- $\text{time}_M(w) :=$  Anzahl Rechenschritte einer TM  $M$  bei Eingabe  $w$
- $\text{TIME}(f(n)) := \{L \in \Sigma^* : \exists \text{ TM } M : L(M) = L \text{ und } \forall w \in L(M) : \text{time}_M(w) \leq f(|w|)\}$
- $\mathcal{P} := \cup_{\text{Polynom } p} \text{TIME}(p(n))$
- $\text{ntime}_M(w) = \begin{cases} \min\{n : P = (s)w \Rightarrow^u n(f)v, \\ f \in F\} \text{ falls } w \in L(M) \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$
- $\text{NTIME}(f(n)) = \{L \in \Sigma^* : \exists \text{ NTM } M : L(M) = L \text{ und } \forall w \in L(M) : \text{ntime}_M(w) \leq f(|w|)\}$
- $\mathcal{NP} = \cup_{\text{Polynom } p} \text{NTIME}(p(n))$
- $V \in \mathcal{NP}$ -hart:  $\Leftrightarrow \forall V' \in \mathcal{NP} : V' \leq_p V$
- $V \in \mathcal{NP}$ -vollständig:  $\Leftrightarrow V \in \mathcal{NP} \cap \mathcal{NP}$ -hart

Probleme siehe Tabelle Achtung: „Rucksack“ ist Knapsack bei Sanders, aber Subsetsum bei Schöning.

## Grammatiken

Sei  $G = (V, \Sigma, P, S)$ ,  $\forall l \rightarrow r \in P$ :

Def. CH-0 (rekursiv aufzählbar) beliebig

Wortproblemkomplexität: semientscheidbar

Definition CH-1 (längenbeschr.)

$|l| \leq |r|$ . Sonderregel für  $\varepsilon$ -Produktion nur bei  $S$

Beispiel:  $a^n b^n c^n$

Wortproblemkomplexität:

$|\Sigma|^{\mathcal{O}(n)}$ , NP-hart Entscheidbare

Probleme:  $L(G) = \emptyset$ ,  $|L(G)| \neq \infty$ ,  $L(G) = \Sigma^*$

### Definition CH-2 (kontextfrei)

CH-1 und  $l \in V$

Beispiel:  $a^n b^n$

Wortproblemkomplexität:  $\mathcal{O}(n^3)$

Pumpinglemma:  $L$  kontextfrei  $\Rightarrow \exists n \in \mathbb{N} : \forall z \in L, |z| > n :$

$\exists u, v, w, x, y : z = uvwx \wedge |vx| \geq 1 \wedge |vwx| \leq$

$n \wedge \forall i \in \mathbb{N}_0 : uv^i w x^i y \in L$

Odgens Lemma:  $L$  kontextfrei

$\Rightarrow \exists n \in \mathbb{N} : \forall z \in L, |z| \geq n :$  Wenn wir in  $z$  mindestens  $n$  Buchstaben markieren

$\exists u, v, w, x, y : z = uvwx$ , dass von den mindestens  $n$  markierten Buchstaben mindestens einer zu  $vx$  gehört und höchstens  $n$  zu  $vwx$  gehören und  $\forall i \geq 0 : uv^i w x^i y \in L$ .

Chomsky-Normalform: falls gilt:

$P \subseteq (V \times \Sigma) \cup (V \times VV)$

1. Terminale in eigene Regeln.

2. Regeln mit rechts  $> 2$  Nicht-Terminale aufsplitten

3.  $\varepsilon$ -Produktionen entfernen

4. Kettenproduktionen entfernen

### Definition Det. KF

Bitte noch eintragen

Wortproblemkomplexität:  $\mathcal{O}(n)$

### Definition CH-3 (regulär)

CH-2 und  $r \in \Sigma \cup \Sigma V$

Beispiel:  $a^* b^*$

Wortproblemkomplexität:  $\mathcal{O}(n)$

Pumpinglemma:  $L$  regulär

$\Rightarrow \exists n \in \mathbb{N} : \forall w \in L, |w| > n :$

$\exists u, v, x : w = uvx \wedge |v| \geq 1 \wedge |uv| \leq$

$n \wedge \forall i \in \mathbb{N}_0 : uv^i x \in L$

Reguläre Ausdrücke:

Beispiel:  $(\emptyset \cup \varepsilon)^* abc^+$

### Nerode-Relation

Für Sprache  $L$ :

$R_L := \{(x, y) \in \Sigma^* \times \Sigma^* : \forall z \in \Sigma^* :$

$xz \in L \Leftrightarrow yz \in L\}$

Für Automat  $M$ :  $R_M := \{(x, y) \in \Sigma^* \times \Sigma^* : \delta^*(s, x) = \delta^*(s, y)\}$

Verfeinerung:  $R$  verfeinert

$R' \Leftrightarrow R \subseteq R'$

Satz:  $L$  regulär  $\Leftrightarrow \text{index}(R_L) \neq \infty$

$Satz: q \not\equiv r \Leftrightarrow \exists z \in \Sigma^* : \delta(q, z) \in F$

$F \not\subseteq \delta(r, z) \in F$

Beispielanwendung:  $a^n b^n$  ist nicht regulär, denn  $\{a^n\}, n \in \mathbb{N}$  sind unendlich verschiedene Äquivalenzklassen, denn für  $i \neq j$  ist  $a^i b^i \in L$ , aber  $a^j b^i \notin L$ , also  $[a^i] \neq [a^j]$ .

Abschlusseigenschaften

Typ	$\cap$	$\cup$	$\cdot$	$*$
CH-3	J	J	J	J
Det. KF	N	N	J	N
CH-2	N	J	N	J
CH-1	J	J	J	J
CH-0	J	J	N	J
semient.	J	J	N	J
entsch.	J	J	J	J

### Automaten-Zuordnung

Typ	Automat
CH-3	Endlicher Automat (NEA, DEA)
Det. KF	det. Kellerautomat (DKellerA)
CH-2	Kellerautomat (NKellerA)
CH-1	linear beschr. Automat (NLBTM)
CH-0	Turingmaschine (TM)

### Automatenäquivalenz

$\varepsilon$ NEA ist zu  $\bar{\varepsilon}$ NEA ist zu DEA und NTM ist zur DTM äquivalent.

NKellerA ist zu DKellerA nicht äquivalent. Äquivalenz von NLBTM und DLBTM ist noch nicht bewiesen.

## Automaten

Mealy-Automat: Ausgabe beim Übergang, Moore-Automat:

Ausgabe beim Zustand.

### DTM

$T = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, F), \delta : Q \times \Gamma \rightarrow$

$Q \times \Gamma \times \{L, R, N\}$

sie hält in  $q(q)av$ :

$\Leftrightarrow \delta(q, a) = (q, a, N)$ .

Konvention:

$\forall q \in F : \forall a \in \Gamma : \delta(q, a) = (q, a, N)$

sie akzeptiert  $w : \Leftrightarrow (s)w$  hält nach endlich vielen Übergängen in

$x(f)y, f \in F$ .  $y$  ist die Ausgabe.

rekursiv aufzählbar

(semientscheidbar):  $\exists T : T$

akzeptiert  $L$

rekursiv (entscheidbar):  $\exists T : T$

akzeptiert  $L \wedge \forall w \in \Sigma^* : T$  hält.

### DTM-Varianten

Mehrere Bänder, mehrere Köpfe, mehrere Dimensionen – alles gleich mächtig wie DTM.

### NTM

$T = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, F), \delta : Q \times \Gamma \rightarrow$

$2^{Q \times \Gamma \times \{L, R, N\}}$

sie hält wie: DTM

sie akzeptiert  $w : \Leftrightarrow \exists$  Folge von Konfigurationen

$s(w) \rightarrow \dots \rightarrow x(f)y, f \in F$

### Gödelnummer-Code

1. Kodiere  $\delta$ :

$\delta(q_i, a_j) = (q_r, a_s, d_t) \rightarrow$

$0^i 10^j 10^r 10^s 10^t$

wobei

$d_t \in \{d_1 = L, d_2 = R, d_3 = N\}$

2. Die TM wird dann kodiert durch:

$111u_1 11u_2 11 \dots 11u_z 111$

mit  $u_i$  die möglichen Übergänge in bel. Reihenfolge.

### NLBTM

NTM  $T = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, F) : \forall a =$

$a_1, \dots, a_n \in \Sigma^+ : a \xrightarrow{\delta} \alpha(q)\beta$  mit

$|\alpha\beta| < n$

### Nichtdet. Kellerautomat

$K = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, \#), \delta :$

$Q \times (\Sigma \cup \varepsilon) \times \Gamma \rightarrow 2^{Q \times \Gamma^*}$

er akzeptiert  $w : \Leftrightarrow \exists$  Folge von Konfigurationen

$(s, w, \#) \rightarrow \dots \rightarrow (q, \varepsilon, \varepsilon), q \in Q$

beliebig.

### Det. Kellerautomat

$K = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, \#), \delta :$

$Q \times (\Sigma \cup \varepsilon) \times \Gamma \rightarrow 2^{Q \times \Gamma^*}$  mit

$\forall q \in Q, a \in \Sigma, A \in \Gamma :$

$|\delta(z, a, A)| + |\delta(z, \varepsilon, A)| \leq 1$

er akzeptiert  $w : \Leftrightarrow \exists$  Folge von Konfigurationen

$(s, w, \#) \rightarrow \dots \rightarrow (f, \varepsilon, \varepsilon), f \in F$

### Automatenminimierung

(Für endliche Automaten)

1. nicht erreichbare Zustände weg

2. Tabelle aller Zustandspaare

$\{z, z'\}$  mit  $z \neq z'$

( $z_1$  bis  $z_k$  links,  $z_0$  bis  $z_{k-1}$  unten)

3. Markieren der Zustandspaare mit  $z \in F$  und  $z \notin F$  oder umgekehrt.

4. Betrachte unmarkierte Paare

$\{z, z'\}$ .

Wenn  $\{\delta(z, a), \delta(z', a)\}$  für mind. ein  $a \in \Sigma$  bereits markiert, markiere  $\{z, z'\}$ .

5. Wiederhole 4. bis keine Änderung mehr.

6. Unmarkierte Paare können verschmolzen werden.

### DEA $\rightarrow$ reg. ex.

Betrachte  $L_{ij}^m := \{w : \Sigma^* :$

Beim Verarbeiten von  $w$  geht  $A$  vom Zustand  $i$  nach  $j$  und dabei höchstens durch  $m\}$ .

Es gilt  $L_{ij}^{m+1} = L_{ij} \cup$

$(L_{i,m+1}^m (L_{m+1,m+1}^m)^* L_{m+1,j}^m)$

So weitermachen, bis man  $L_{sf}^n$  hat

( $s$  Startzustand,  $f$  Endzustand,  $n$  Zahl der Zustände).

### NEA $\rightarrow$ DEA

Potenzmengenkonstruktion.

Knotenmengen sind Endzustände, wenn einer ihrer enthaltenen Zustände ein Endzustand ist.

### Whileprogramm

$\mathbb{N}$  main( $\mathbb{N}x_1, \dots, x_k$ ) $\{$

$\mathbb{N}x_0 = 0; \mathbb{N}x_{k+1} = 0; \dots$

body;

return  $x_0$ ;

$\}$

body  $\in \{ \text{Sequenz } '; \text{while}(x_i \neq 0) :$

Schleife,  $x_i := x_i + c$  wobei

$c \in \{-1, 0, 1\}$  und  $0 - 1 := 0\}$

„loop“-Konstrukte im body erlaubt, aber redundant.

## Loopprogramm

$\mathbb{N}$  main( $\mathbb{N}x_1, \dots, x_k$ ) $\{$

$\mathbb{N}x_0 = 0; \mathbb{N}x_{k+1} = 0; \dots$

body;

return  $x_0$ ;

$\}$

body  $\in \{ \text{Sequenz } '; \text{loop}(x_i) :$

Schleife, wobei schon vor dem Durchlauf bekannt ist wie oft die Schleife wiederholt wird,  $x_i := x_i + c$

wobei  $c \in \{-1, 0, 1\}$  und  $0 - 1 := 0\}$

## Ackermannfunktion

### Definition

Function  $a(x, y)$

if  $x = 0$  then return  $y + 1$

if  $y = 0$  then return  $a(x - 1, 1)$

return  $a(x - 1, a(x, y - 1))$

### Eigenschaften

•  $\forall$  Loopprogramm

$P : \exists k : \forall n \in \mathbb{N} : f_P(n) < a(k, n)$

•  $y < a(x, y)$

•  $a(x, y) < a(x, y + 1)$

•  $a(x, y + 1) < a(x + 1, y)$

•  $a(x, y) < a(x + 1, y)$

•  $a(x, y) \leq a(x', y')$  falls  $x \leq x'$  und  $y \leq y'$

## Pseudopolynomialität

Nur relevant für Probleme mit Zahlen

## Approximation

$\mathcal{A}$  ein polynomialer

Approximationsalgo, OPT

Optimalwert:

### absoluter Approxalgo

$\forall I$  Instanzen eines

Optimierungsproblems

$\exists K : \text{OPT}(I) - \mathcal{A}(I) \leq K$

### Approxalgo relativer Güte

$\forall I$  Instanz  $K : \mathcal{R}_A(I) \leq K, K \geq 1$

konstant.

$\mathcal{R}_A =$

$\begin{cases} \frac{\mathcal{A}(I)}{\text{OPT}(I)} \text{ falls Minimierungspr.} \\ \frac{\text{OPT}(I)}{\mathcal{A}(I)} \text{ falls Maximierungspr.} \end{cases}$

# NP-Vollständige Probleme

Problem	Gegeben	Gesucht	polyn. red. von
SAT	aussagenlog. Formel	Erfüllbarkeit	TM
3SAT	boolesche Formel in KNF mit 3 Lit. pro Klausel	Erfüllbarkeit	SAT
Set Cover	endl. Menge $M$ und $T_1, \dots, T_k \subseteq M$ , Zahl $n \leq k$	$n$ Mengen $T_{i_1}, \dots, T_{i_n}$ mit $M = \cup_{j=1 \dots n} T_{i_j}$	3SAT
Steiner-Tree	Unger. Graph $G = (V, E)$ mit Gewichten $c : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ , $V = R$ (Pflicht-) $\cup F$ (Steinerknoten)	Baum $T \subseteq E$ der mit minimalen Kosten alle Pflichtknoten verbindet	3SAT
Clique	ungerichteter Graph $G = (V, E)$ und Zahl $k \in \mathbb{N}$	Clique $V' \subseteq V$ mit $ V'  \geq k$ , also $\forall i, j \in V', i \neq j$ , gilt: $\{i, j\} \in E$	3SAT
Vertex Cover	ungerichteter Graph $G = (V, E)$ und Zahl $k \in \mathbb{N}$	überdeckende Knotenmenge $V' \subseteq V$ mit $ V'  \geq k$ , sodass $\forall \{u, v\} \in E: u \in V'$ oder $v \in V'$	Clique
Subset Sum	Zahlen $a_1, \dots, a_k \in \mathbb{N}$ und $W \in \mathbb{N}$	Teilmenge $J \subseteq \{1, \dots, k\}$ mit $\sum_{i \in J} a_i = W$	3SAT
Partition	Zahlen $a_1, \dots, a_k \in \mathbb{N}$	Teilmenge $J \subseteq \{1, \dots, k\}$ mit $\sum_{i \in J} a_i = \sum_{i \notin J} a_i$	Subset Sum
Bin Packing	Behältergröße $b \in \mathbb{N}$ , Behälteranzahl $k \in \mathbb{N}$ , Objekte $a_1, \dots, a_k \leq b$	Abb. $f : \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, k\}$ , sodass $\forall j = 1, \dots, k : \sum_{f(i)=j} a_i \leq b$	Partition
Knapsack	endl. Menge $M$ , Gewichsfkt. $w : M \rightarrow \mathbb{N}_0$ , Kostenfkt. (Profutfkt.) $c : M \rightarrow \mathbb{N}_0$ , $W, C \in \mathbb{N}_0$	$M' \subseteq M$ mit $\sum_{a \in M'} w(a) \leq W$ und $\sum_{a \in M'} c(a) \geq C$	Subset Sum
ILP	Vektor $x = (x_1, \dots, x_n)$ und Bedingungen $a \cdot x R b$ mit $R \in \{\leq, \geq, =\}$ , $a \in \mathbb{Z}^n$ , $b \in \mathbb{Z}$	Gibt es eine Belegung von $x$ , so dass alle Bedingungen erfüllt sind?	Subset Sum
Gericht. Hamiltonkreis	gerichteter Graph $G = (V, E)$	Hamiltonkreis: einfacher Kreis der jeden Knoten genau einmal enthält	3SAT
Hamiltonkreis	ungerichteter Graph $G = (V, E)$	Hamiltonkreis	Gericht. Hamiltonkreis
TSP	Vollständiger Graph $G = (V, V \times V)$ mit Abstands fkt. $d : V \times V \rightarrow \mathbb{R}^+$ und Zahl $k$	Hamiltonkreis $C$ mit Länge $\sum_{(u,v) \in C} d(u, v) \leq k$	Hamiltonkreis
Coloring	ungerichteter Graph $G = (V, E)$ und Zahl $k \in \mathbb{N}$	$c : V \rightarrow 1, \dots, k$ mit $\forall \{u, v\} \in E : c(u) \neq c(v)$	3SAT