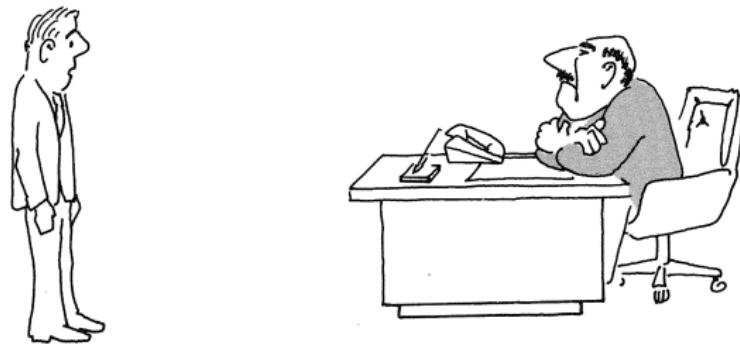


Die $P \neq NP$ -Vermutung

Adrian Hein, Florian Weber

6. Mai 2015

Motivation



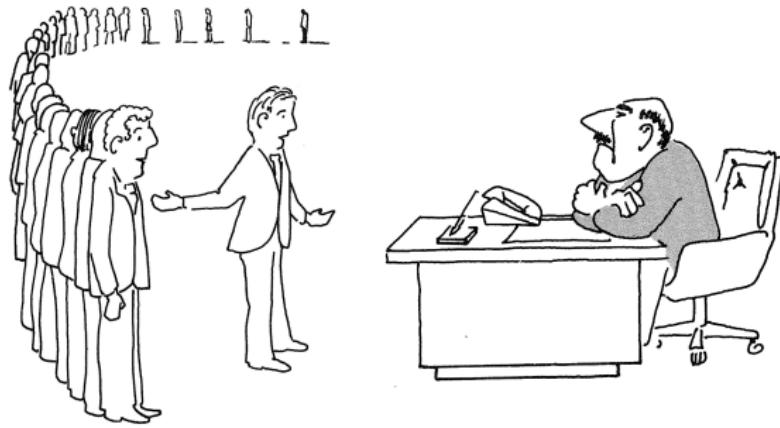
„I can't find an efficient algorithm, I guess I'm just too dumb.“

Motivation



„I can't find an efficient algorithm, because no such algorithm is possible.“

Motivation



„I can't find an efficient algorithm, but neither can all these famous people.“

Themen

- Einführung
- Das Cook-Levin Theorem
- Wichtige NP-vollständige Probleme
- Andere Komplexitätsklassen
- Indizien
- Implikationen
- Umgang mit NP-vollständigen Problemen
- Zusammenfassung
- Quellen

Einführung

Turingmaschine

- Mathematische Abstraktion eines Computers
- Besteht aus:
 - Steuerwerk
 - unendlich langes Steuerband
 - Lese- und Schreibkopf

Einführung

Turingmaschine

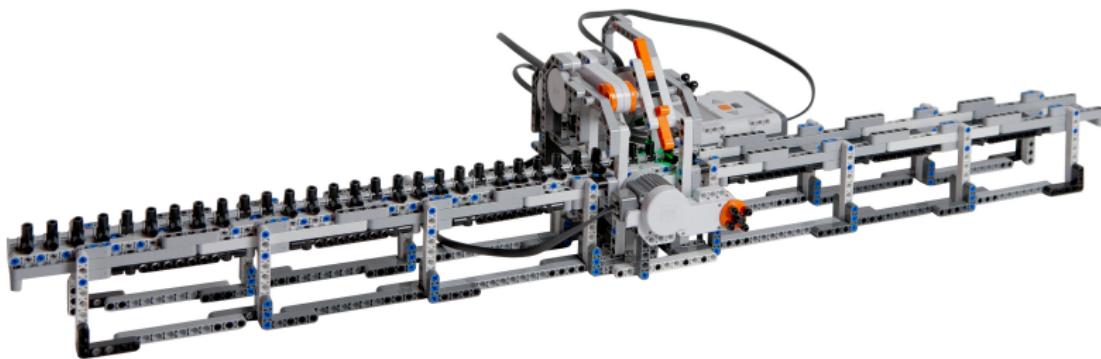
- Pro Schritt wird:
 - ein Zeichen gelesen
 - ein Zeichen geschrieben
 - eine Bewegung ausgeführt
- Jeder Schritt ist nur abhängig von:
 - aktuellem Zeichen auf dem Band
 - aktuellem Zustand der TM
- Eine TM hat endlich viele Zustände
- Man kann Zustände als Endzustände definieren

Einführung

Turingmaschine formal

- Formal besteht eine TM aus einem Tupel
 $\mathcal{M} := \{Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F\}$ mit:
 - Q , der endlichen Zustandsmenge
 - Σ , dem endlichen Eingabealphabet
 - Γ , dem endliche Bandalphabet und es gilt $\Sigma \subset \Gamma$
 - $\delta: (Q \setminus F) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, 0, R\}$, der (partiellen) Überführungsfunktion
 - $q_0 \in Q$, dem Anfangszustand
 - $F \subseteq Q$, der Menge der akzeptierenden Zustände
- $\square \in \Gamma \setminus \Sigma$ bezeichnet das leere Feld

Einführung Turingmaschine



Einführung

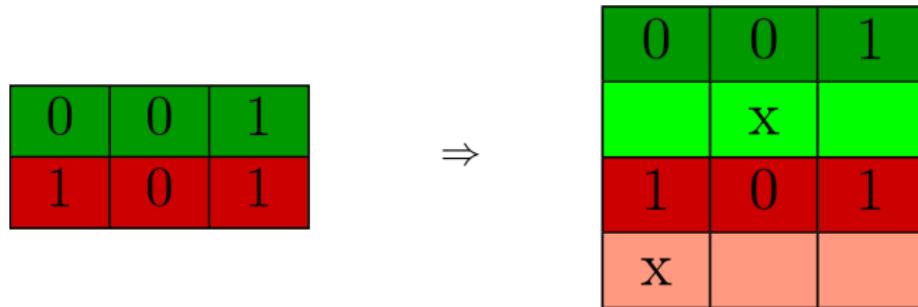
Turingmaschine (nichtdeterministisch)

- Ähnlich der deterministischen TM
- NDTM hat allerdings mehrere Übergangsfunktionen
- Endet eine Sequenz von Entscheidungen in F gilt die Eingabe als akzeptiert
- Im Gegensatz zur deterministischen TM nicht ohne Weiteres realisierbar

Einführung

Turingmaschine (Mehrband)

- Hat anstatt einem Band mehrere mit jeweils einem Lese- und Schreibkopf



- Kann durch eine TM mit einem Band simuliert werden

0 | 1 | x | 0 | x | 0 | 1 | 1 |

- Mehrband TMs sind genauso mächtig wie normale TMs aber evt. anschaulicher

Einführung

Die Klasse P

- Enthält alle Entscheidungsprobleme die in Polynomialzeit von einer TM lösbar sind
- Probleme in P gelten als praktisch lösbar
- Ist unter Komplementbildung abgeschlossen
- Beispiele sind:
 - Lineare Programmierung/Optimierung
 - PRIMES (AKS-Primzahltest)
 - Wortproblem für kontextfreie Sprachen

Einführung

Die Klasse NP (formal)

- Eine Sprache $L \subseteq \{0, 1\}^*$ liegt in NP, wenn es:
 - ein Polynom $p : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$
 - sowie eine in Polynomialzeit laufende TM \mathcal{M} , den sogenannten Verifizierer für L , gibt
 - sodass für jedes $x \in \{0, 1\}^*$ gilt:
 - $x \in L \Leftrightarrow \exists u \in \{0, 1\}^{p(|x|)}$, sodass $\mathcal{M}(x, u) = 1$
- In diesem Fall nennt man u ein Zertifikat für x .

Einführung

Die Klasse NP (alternativ)

- Alle Entscheidungsprobleme die von einer NDTM \mathcal{M} in Polynomialzeit gelöst werden
- x ist eine Lösung, wenn es eine Sequenz von Entscheidungen gibt, sodass \mathcal{M} in einem der akzeptierenden Zustände (F) hält.
- Ursprüngliche Definition, deswegen auch NP (nondeterministic polynomial time)
- Beide Definitionen äquivalent, da die Sequenz von Entscheidungen, die zu F führt als Zertifikat betrachtet werden kann

Einführung

Die Klasse coNP

- Alle Sprachen, deren Komplement in NP liegt
- NICHT das Komplement zu NP
- Beispiel: Kontradiktion

Einführung

Reduktion

- A heißt reduzierbar auf B , wenn es einen Algorithmus gibt, der aus jedem Problem aus A in Polynomialzeit ein Problem aus B macht
- Man schreibt dann $A \preceq B$
- Gibt es einen Algorithmus zur Lösung von B und gilt $A \preceq B$, so kann dieser auch A lösen
- Man sagt B ist mindestens so schwer wie A

Einführung

NP-Vollständigkeit

- Gilt $L \preceq L'$, $\forall L \in \text{NP}$, so nennt man L' NP-schwer
- Liegt L' selber auch in NP, nennt man L' NP-vollständig
- Um NP-schwere für L' zu zeigen genügt es $L \preceq L'$ für ein NP-schweres L zu zeigen
- Ist ein Problem A NP-schwer, so ist das entsprechende Problem \overline{A} in coNP logischerweise coNP-schwer

Das Cook-Levin Theorem



Stephen Cook, Leonid Levin

Das Cook-Levin Theorem

Konjunktive Normalform

- Boolesche Funktionen der Form

$$(a \vee b \vee c) \wedge (d \vee e) \wedge (f \vee g \vee h \vee i)$$

stehen in **konjunktiver Normalform**

- Lösungen stellen alle Belegungen dar, die zu 1 evaluieren
- Das Entscheidungsproblem, ob es eine Lösung gibt, ist als **SAT** (von „satisfiable“) bekannt
- Der Spezialfall, bei dem jede Teilklausel genau drei Variablen beinhaltet, heißt **3SAT**:

$$(a \vee b \vee c) \wedge (d \vee e \vee f) \wedge \dots$$

Das Cook-Levin Theorem

Boolsche Funktionen

- Jede boolsche Funktion lässt sich in konjunktiver Normalform darstellen
- TMs die Sprachen entscheiden, sind boolsche Funktionen
- Die Größe einer KNF für n Variablen liegt in $O(n \cdot 2^n)$

Das Cook-Levin Theorem

Reduktion * auf SAT

- $O(n \cdot 2^n)$ offensichtlich zu groß
- Sei \mathcal{M} eine TM die eine NP-vollständige Sprache entscheidet und die
 - ein Eingabe- und ein Ausgabe/Arbeitsband habe
 - bei der die Position des Kopfes in Schritt i nur von der Länge der Eingabe abhängt
 - gültige Annahme, da in $O(f(n)^2)$ simulierbar
- Sei Q die Menge der Zustände von \mathcal{M}
- Sei Γ das Bandalphabet von \mathcal{M}
- Sei $\langle a, b, q \rangle_i \in \Gamma \times \Gamma \times Q$ der Snapshot von \mathcal{M} in Schritt i

Das Cook-Levin Theorem

Reduktion * auf SAT

- Snapshots können offensichtlich als Zeichenketten konstanter Länge kodiert werden.
- Ein Snapshot S_i hängt ab von:
 - S_{i-1}
 - einem Zeichen fester Position der Eingabe
 - dem letzten Snapshot an der selben Stelle
- Es gibt für jedes i genau einen korrekten Snapshot
- Daraus folgt: Es gibt eine Funktion f , die zwei Snapshots und eine Position auf dem Eingabeband auf einen neuen Snapshot abbilden:

$$S_i = f(S_{i-1}, S_{\text{prev}(i)}, E_{\text{inputpos}(i)})$$

Das Cook-Levin Theorem

Reduktion * auf SAT

- Um eine Lösung für die betrachtete Sprache zu finden, muss man eine Abfolge von TM-Schritten finden, die zum Ergebnis führt.
- Die einzelnen Schritte (und damit die Snapshotkette) kodieren eine Lösung, sind aber zunächst unbekannt.
- Die Snapshotkette lässt sich aber als polynomielle KNF schreiben.
- Angenommen, es gäbe einen Polyzeit-Entscheider für SAT, so könnte dieser damit auch die Kette von Snapshots für andere Probleme finden, und damit diese in Polyzeit entscheiden!

Das Cook-Levin Theorem

Reduktion SAT auf 3SAT

- Wir möchten die Klausel $F_1 = (a \vee b \vee c \vee d)$ mit Lösung L_1 in 3SAT-Klauseln zerlegen
- Sei h eine neu eingeführte Hilfsvariable
- Dann ist $F_2 = (a \vee b \vee h) \wedge (\bar{h} \vee c \vee d)$ mit Lösung L_2 eine äquivalente Formel
- Erfüllbarkeit ist äquivalent:
 - $F_1 \Rightarrow F_2$: 2 Fälle:
 - $a \vee b = 1$: L_2 mit $h = 0$ erfüllt
 - $c \vee d = 1$: L_2 mit $h = 1$ erfüllt
 - $F_2 \Rightarrow F_1$: 2 Fälle:
 - $h = 0 \Rightarrow (a \vee b) = 1$
 - $h = 1 \Rightarrow (c \vee d) = 1$

Das Cook-Levin Theorem

Reduktion SAT auf 3SAT

- Allgemein gilt: Um eine SAT-Klausel $(a_1 \vee a_2 \vee \cdots \vee a_n)$ nach 3SAT zu konvertieren, genügt es, sie wie folgt zu schreiben:

$$(a_1 \vee a_2 \vee h_1) \wedge (\overline{h_1} \vee a_3 \vee h_2) \wedge \cdots \wedge (\overline{h_{n-2}} \vee a_{n-1} \vee a_n)$$

- $h_1 \dots h_{n-2}$ sind hierbei neu eingeführte Hilfsvariablen
- SAT liegt in NP \Rightarrow 3SAT liegt als Spezialfall von SAT in NP
- Laufzeit der Reduktion SAT \rightarrow 3SAT ist polynomiell
- \Rightarrow 3SAT ist NP-vollständig

Wichtige NP-vollständige Probleme

MY HOBBY:

EMBEDDING NP-COMPLETE PROBLEMS IN RESTAURANT ORDERS

CHOTCHKIES RESTAURANT	
~~ APPETIZERS ~~	
MIXED FRUIT	2.15
FRENCH FRIES	2.75
SIDE SALAD	3.35
HOT WINGS	3.55
MOZZARELLA STICKS	4.20
SAMPLER PLATE	5.80
~~ SANDWICHES ~~	
BARBECUE	6.55



Wichtige NP-vollständige Probleme

INDSET

Besitzt ein Graph G mindestens k paarweise nicht über eine Kante verbundene Knoten (=stabile Menge)?

INDSET ist NP-vollständig. Hierzu definieren wir eine Transformation beliebiger 3SAT-Instanzen zu Graphen:

- Erzeuge für jede Klausel einen vollständig verbundenen Teilgraph (=Clique), dessen Knoten jeweils eine gültige Belegung repräsentieren.
- Verbinde alle nicht verbundenen Knoten, die gemeinsam zu einer widersprüchlichen Belegung führen würden.
- Bestimme nun eine stabile Menge der Größe k . Deren Knoten kodieren nun eine gültige Belegung für die 3SAT-Instanz.

Wichtige NP-vollständige Probleme

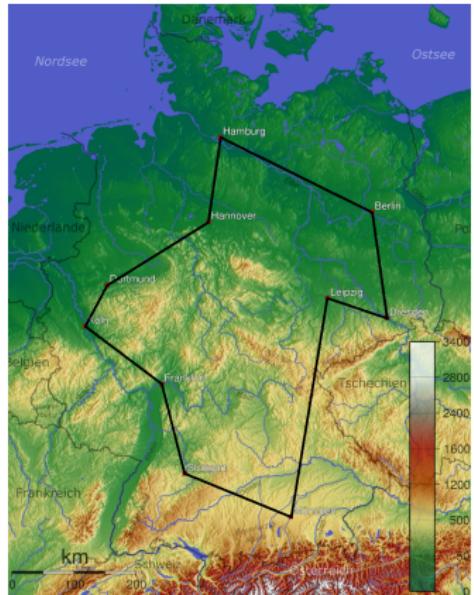
0/1 IPROG

- Gegeben: m lineare Ungleichungen über n Variablen
- Gesucht: eine Lösung für das System wobei die Variablen nur 0 oder 1 annehmen können
- In NP: die Belegung der Variablen kann als Zertifikat gesehen werden
- NP-vollständig: SAT \preceq 0/1 IPROG, da jede Klausel als Ungleichung aufgefasst werden kann
 - $u_1 \vee \overline{u_2} \vee \overline{u_3}$ kann ausgedrückt werden durch
$$u_1 + (1 - u_2) + (1 - u_3) \geq 1$$

Wichtige NP-vollständige Probleme

Traveling Salesman (TSP)

*Gibt es zu n Städten einen
Rundweg der kürzer ist als b ?*



Andere Klassen

NP-Intermediate

- Gilt $P \neq NP$ so gibt es eine Klasse NP-Intermediate (NPI) für die gilt:
 - $A \in NPI \Leftrightarrow A \in NP, A \notin P$ und A ist nicht NP-Schwer
- Wurde von Richard Ladner 1975 bewiesen
- Er konstruierte ein künstliches Problem welches unter der Annahme $P \neq NP$ in NPI liegt
- Es ist nicht sicher ob es "natürliche" Probleme in NPI gibt

Andere Klassen

Vermutete Probleme in NPI

- Man vermutet, dass die Primfaktorzerlegung in NPI liegt
- Bisher noch kein Algorithmus in Polynomialzeit gefunden
- Noch kein Beweis für NP-Schwere
- Aktuelle Kryptographie baut darauf auf (RSA)

Andere Klassen

EXP und NEXP

- Probleme deren Zertifikat in exponentieller Zeit verifiziert bzw. gefunden werden kann.
- In vieler Hinsicht analog zu P und NP, aber in der Praxis weniger interessant.

Andere Klassen

Platzbasierte

- $L \subseteq NL$
 - logarithmischer Platz
- $PSPACE = NPSPACE$
 - polynomieller Platz
- $EXPSPACE = NEXPSPACE$
 - exponentieller Platz

Es gilt:

- $L \subseteq NL \subseteq P \subseteq NP \subseteq PSPACE$
- $NL \subset PSPACE$

Andere Klassen

Sonstige

- PP, BPP
 - Propabilistische Klassen
- BQP (Bounded Error Quantum Polynomial), QMA (Quantum Merlin Arthur), ...
 - Analoge Klassen für Quantencomputer

Indizien

$P \neq NP$

- Unüberschaubar viele Probleme in P und NP. Trotz enormem Aufwand nicht eine einzige Reduktion.
- Reduktionen oft um ein ε nicht polynomiell. Warum, wenn $P = NP$?
- Existenzbeweise meist leichter als Nichtexistenzbeweise. Deswegen schwer?
- $NL \subset PSPACE$, eine der Untermengenrelationen dazwischen **muss** also echt sein.

Indizien

$\text{coNP} \neq \text{NP}$

- Bisher wurde noch für kein coNP-schweres Problem ein polynomielles Zertifikat gefunden
- Es konnte noch für kein NP-schweres Problem nachgewiesen werden, dass es in coNP liegt
- Es konnte noch für kein Problem aus $\text{NP} \cap \text{coNP}$ NP-schwere bzw. coNP-schwere nachgewiesen werden

Indizien

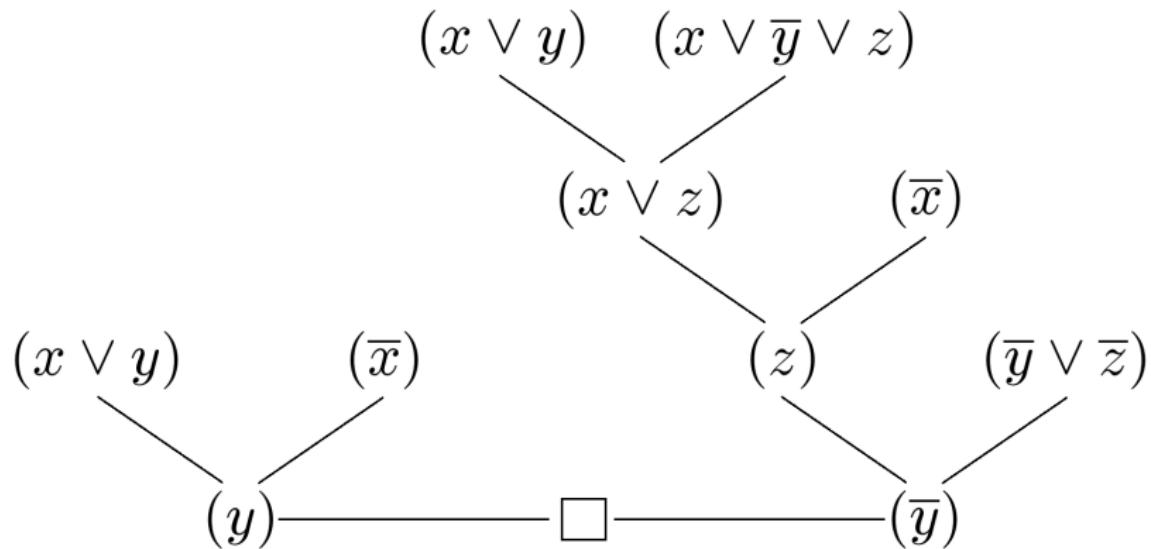
Resolution als Indiz für $\text{coNP} \neq \text{NP}$

- Resolution prüft ob eine KNF eine Kontradiktion ist
- Wähle 2 Klauseln C_1, C_2 , sodass ein Literal u in C_1 und seine Negierung \bar{u} in C_2 vorkommen
- Bilde eine neue Klausel $C_3 = C_1 \setminus \{u\} \vee C_2 \setminus \{\bar{u}\}$
- $C_1 = (x \vee \bar{y} \vee z)$ und $C_2 = (y \vee z)$ werden zu $C_3 = (x \vee z)$
- Es gilt $C_3 = \text{false} \Rightarrow C_1 \wedge C_2 = \text{false}$
- Kann man eine leere Klausel herleiten ist die Formel eine Kontradiktion

Indizien

Resolution Beispiel

$$F = (x \vee y) \wedge (x \vee \bar{y} \vee z) \wedge (\bar{x}) \wedge (\bar{y} \vee \bar{z})$$



Indizien

Resolution als Indiz für $\text{coNP} \neq \text{NP}$

- 1985 bewies Haken eine untere Schranke für die Größe des Resolutionsbeweises für das Taubenschlagprinzip
- Diese ist $(1.49^{0.01})^n \approx (1,004)^n$ und unabhängig vom gewählten Algorithmus
- Aufbauend auf Hakens Beweis wurden exponentielle untere Schranken auch für andere Probleme gezeigt
 - mittels Resolution ist $\text{coNP} = \text{NP}$ nicht beweisbar
 - ⇒ Indiz für $\text{coNP} \neq \text{NP}$

Implikationen

Philosophisch

- In den Naturwissenschaften wären Hypothesen mit vergleichbarer Faktenlage als Theorien anerkannt.
 - „nur“ ein Problem weil Informatik eine Strukturwissenschaft ist
- Folgen oft völlig unintuitiv:
 - Warum sollte es keine Suchprobleme geben, die sich nicht besser als mit brute-force lösen lassen?
 - Insbesondere bei nichtdeterministischen TMs: Polyzeitreduktion praktisch nicht vorstellbar.
 - Alle Probleme in NP, die nicht auch in leichteren Klassen als P liegen, vergleichbar schwer, es gäbe keine Klasse NPI

Implikationen

Kryptographisch

- Nicht **zwingend** katastrophal

- Feste aber große Exponenten reichen vermutlich auch:
 $2^{512} \ll 512^{100}$
- Heutige Krypto meist nicht NP-vollständig (Faktorisierung in NPI vermutet)
- Quantencomputer sind hier eine **viel** realere Bedrohung.
(→ Shor-Algorithmus)

- Andererseits: Passwort raten, leicht gemacht?

- Gibt es ein Passphrase der Länge $\leq n$ die diese Datei entschlüsselt? $\in \text{NP}$

Implikationen

$\text{coNP} \stackrel{?}{=} \text{NP}$

- Aus $P = NP$ folgt automatisch $\text{coNP} = NP$
 - Umkehrung gilt nicht automatisch
- Allerdings folgt aus $\text{coNP} \neq NP$ automatisch $P \neq NP$:
 - man wählt ein NP -vollständiges Problem L
 - das Komplement \bar{L} von L liegt laut Definition in coNP
 - würde $P = NP$ gelten, gilt $\bar{L} \in P$
 - da P unter Komplementbildung abgeschlossen ist gilt $\bar{L} \in P$
 - da gilt $P = NP$ gilt $\bar{L} \in NP$
 - daraus würde folgen $\text{coNP} = NP$ was ein Widerspruch ist

Umgang mit NP-vollständigen Problemen



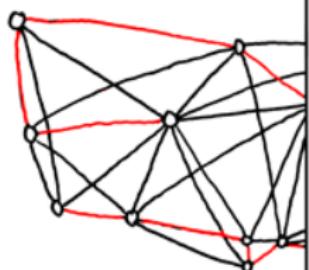
Umgang mit NP-vollständigen Problemen

- Existieren vielleicht gute Näherungslösungen?
- Ist der Worst-Case wirklich wahrscheinlich?
- Ist n wirklich so groß, dass NP-Vollständigkeit ein Problem darstellt?

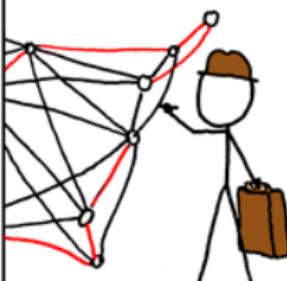
Umgang mit NP-vollständigen Problemen

- Gibt es vielleicht bessere, nicht NP-schwere Modelierungen?

BRUTE-FORCE
SOLUTION:
 $O(n!)$



DYNAMIC
PROGRAMMING
ALGORITHMS:
 $O(n^2 2^n)$



SELLING ON EBAY:
 $O(1)$

STILL WORKING
ON YOUR ROUTE?
SHUT THE HELL UP.



Zusammenfassung

- Alle NP-Probleme können in Polyzeit auf NP-vollständigen Probleme reduziert werden.
- Wichtige Beispiele für NP-vollständige Probleme sind SAT, 3SAT, INDSET, 0/1-PROG und TSP
- Zu P vs. NP Analoge Probleme existieren auch zwischen diversen anderen Komplexitätsklassen
- $P \neq NP$ ist zwar *unbewiesen* aber es gibt sehr gute *Indizien* dafür
- Die Implikationen von $P=NP$ sind gravierend, aber nicht zwingend katastrophal
- In der Realität sind NP-vollständige Probleme bisweilen gut zu meistern

Quellen

Literatur

- „Aussagenlogik: Deduktion und Algorithmen“ von Hans Kleine Büning und Theodor Lettmann
- „Computational Complexity: A Modern Approach“ von Sanjeev Arora und Boaz Barak

- <http://de.wikipedia.org/wiki/>
 - AKS-Primzahltest
 - Satz_von_Ladner
 - NP-intermediate
- <https://complexityzoo.uwaterloo.ca/>
 - Complexity_Zoo:B#bqp
 - Complexity_Zoo:B#bpp
 - Complexity_Zoo:C#conp
 - Complexity_Zoo:P#p
 - Complexity_Zoo:Q#qma

- https://homepages.uni-tuebingen.de/~student/monika.gehweiler/Applets/html/resolutionIndex.html
- http://www.ti.inf.ethz.ch/ew/lehre/extremal04/raemy.pdf
- http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/academic/class/46927-f97/slides/Lec4/sld033.htm
- http://www.cosy.sbg.ac.at/~held/teaching/wiss_arbeiten/slides_02-03/kmrr.pdf
- http://hackvalue.de/files/tsp.pdf
- http://www.scottaaronson.com/blog/?p=1720

- Motivations-Comics: „Computers and Intractability – A Guide to the Theory of NP-Completeness“ von Michael R. Garey und David S. Johnson
- Lego-Turingmaschine: <http://www.legoturingmachine.org>
- Stephen Cook (CC-BY-SA 3.0, Jiří Janíček): <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prof.Cook.jpg>
- Leonid Levin (CC-BY-SA 3.0, Sergio01):
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LeonidLevin2010.jpg>

- TSP-Karte (CC-BY-SA 3.0):
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deutschland_topo.png
- „My Hobby“ (CC-BY-NC 2.5, Randall Munroe):
<https://xkcd.com/287/>
- „Don't Panic“: <http://everfalling.deviantart.com/art/DON-T-PANIC-15975789>
- „Traveling Salesman“ (CC-BY-NC 2.5, Randall Munroe):
<https://xkcd.com/399/>