

# Die $P \neq NP$ -Vermutung

6. Mai 2015

Adrian Hein, Florian Weber

# Einführung

# Turingmaschine

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

# 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

# Turingmaschine

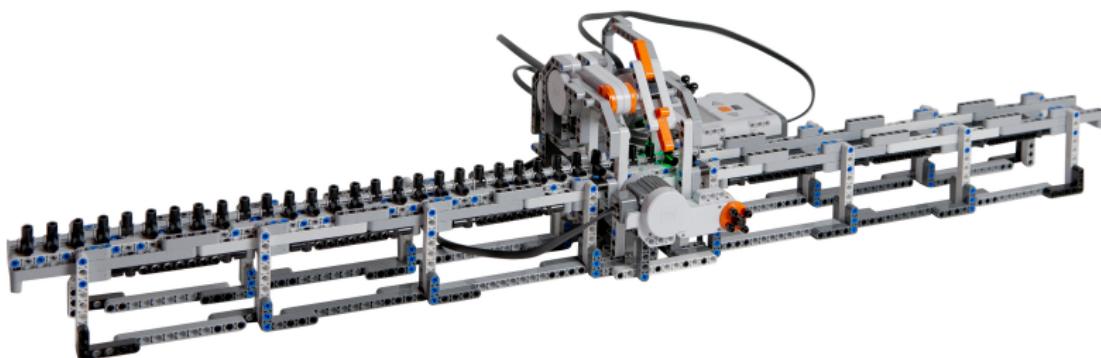


Abbildung 1:<http://www.legoturingmachine.org>

# Turingmaschine

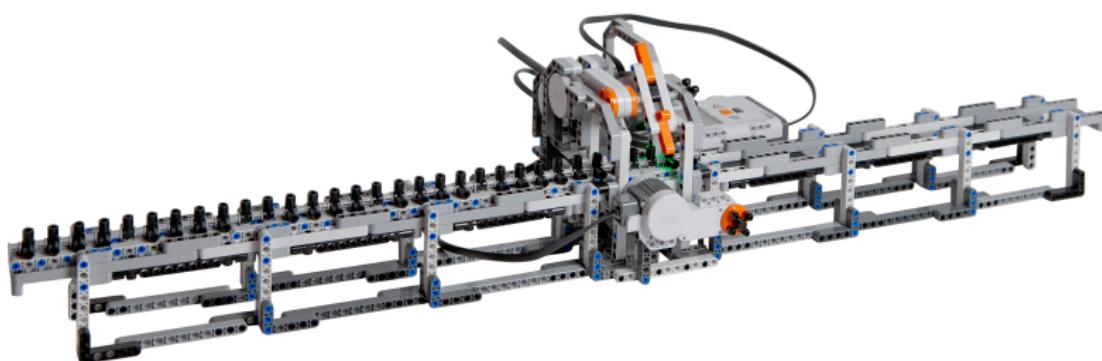


Abbildung 2:<http://www.legoturingmachine.org>

# Turingmaschine formal

- Formal besteht eine TM aus einem Tupel  
 $\mathcal{M} := \{Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F\}$  mit:
  - $Q$ , die endlichen Zustandsmenge
  - $\Sigma$ , das endlichen Eingabealphabet
  - $\Gamma$ , das 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
  - $\square \in \Gamma \setminus \Sigma$ , das leere Feld
  - $F \subseteq Q$ , die Menge der akzeptierenden Zustände

# Turingmaschine (nichtdeterministisch)

- Ähnlich der deterministischen TM
- NDTM hat allerdings zwei Übergangsfunktionen  $\delta_0$  und  $\delta_1$
- Endet eine Sequenz von Entscheidungen in  $F$  gilt die Eingabe als akzeptiert
- Im Gegensatz zur deterministischen TM nicht ohne Weiteres realisierbar

# Turingmaschine (Mehrband)

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

0	0	1
	X	
1	0	1
X		

- Kann durch eine TM mit einem Band simuliert werden
- Mehrband TMs sind genauso mächtig wie normale TMs aber evt. anschaulicher

# 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)
  - HORNSAT

# 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  $x$ .

# 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  $F$  hält.
  - es gilt in diesem Fall  $\mathcal{M}(x) = 1$
- Gibt es keine Sequenz für die  $\mathcal{M}$  in  $F$  hält, gilt  $\mathcal{M}(x) = 0$
- Ursprüngliche Definition, deswegen auch NP (nondeterministic polynomial time)
- Beide Definitionen äquivalent, da die Sequenz von Entscheidungen, die zu  $F$  führt als Verifizierer betrachtet werden kann

# Die Klasse coNP

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

# Reduktion

- $A$  heißt reduzierbar auf  $B$ , wenn es einen Algorithmus gibt, der aus jedem Problem aus  $A$  in Polynomialzeit ein Problem aus  $B$  macht
- 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  $A$

# 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  $A'$  in coNP logischerweise coNP-schwer

# Cook-Levin Theorem

# Stephen Cook und Leonid Levin



Abbildung 3:Stephen Cook (CC-BY-SA 3.0, Jiří Janíček), Leonid Levin (CC-BY-SA 3.0, Sergio01)

# konjunktive Normalform

- 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  $O(n \cdot 2^n)$  o.B.
- Siehe auch: TI1 (Digitaltechnik)

# 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  $\Gamma$  das Bandalphabet von  $\mathcal{M}$
- Sei  $\langle a, b, q \rangle_i \in Q \times Q \times \Gamma$  der Snapshot der TM in Schritt  $i$

# 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:

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

# 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 polinomiale 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!

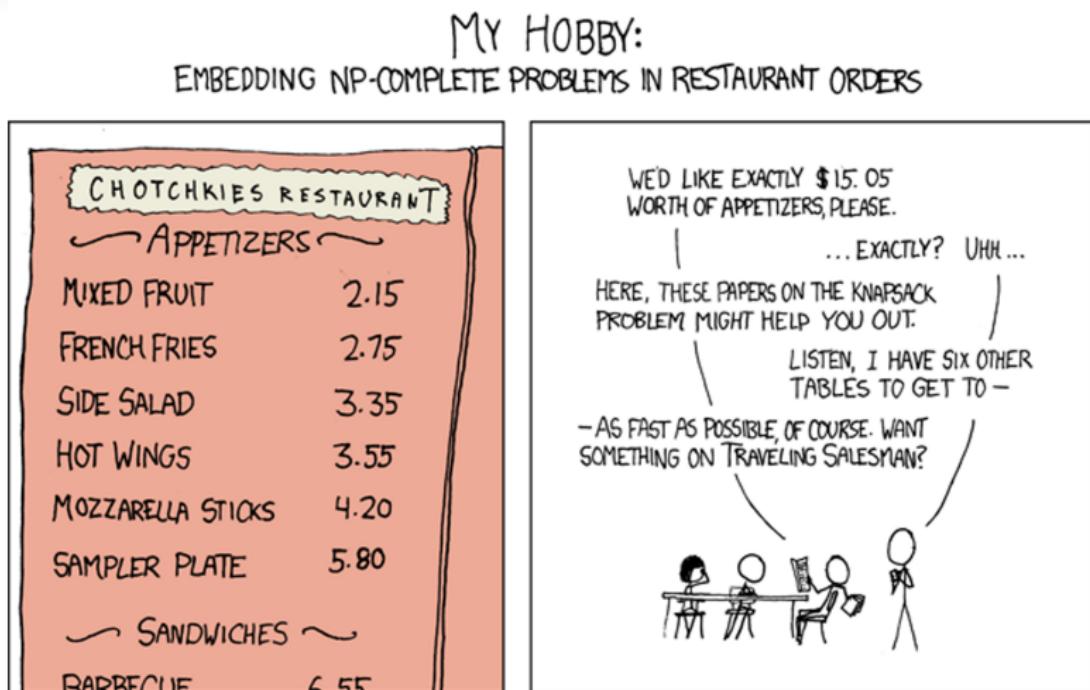
# Reduktion SAT auf 3SAT

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

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

Hierbei sind  $h_1 \dots h_{n-2}$  neu eingeführte Hilfsvariablen.

## Wichtige NP-vollständige Probleme

Abbildung 4:CC-BY-NC 2.5, Randall Munroe, <https://xkcd.com/287/>

# INDSET

*Besitzt ein Graph  $G$  mindestens  $n$  paarweise nicht über eine Kante verbundene Knoten?*

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

- Erzeuge für jede Klausel eine Clique, deren 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  $n$ . Deren Knoten kodieren nun eine gültige Belegung für die 3SAT-Instanz.

# 0/1 IPROG

- Gegeben:  $\mathcal{M}$  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
$$u_1 + (1 - u_2) + (1 - u_3) \geq 1$$

# Traveling Salesman (TSP)

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

- In NP: die Reihenfolge der Städte kann als Zertifikat betrachtet werden
- NP-Vollständig: HAMILTON  $\preceq$  TSP, indem man jede Kante des Graphs mit 1 gewichtet
  - Gibt es einen Pfad der Länge  $l = |V|$  so hat der Graph einen Hamiltonkreis

## 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.

# Platzbasierte

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

Es gilt:

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

# Sonstige

- NPI (NP-Intermediate)
  - NP-Probleme, weder in P, noch NP-vollständig
  - existiert wenn  $P \neq NP$
- BQP, QMA, ...
  - 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  $\epsilon$  nicht polynomiell. Warum, wenn P = NP?
- Existenzbeweise meist leichter als Nichtexistenzbeweise. Deswegen schwer?
- NL  $\subset$  PSPACE, eine der Untermengenrelationen dazwischen **muss** also echt sein.

# coNP $\neq$ NP

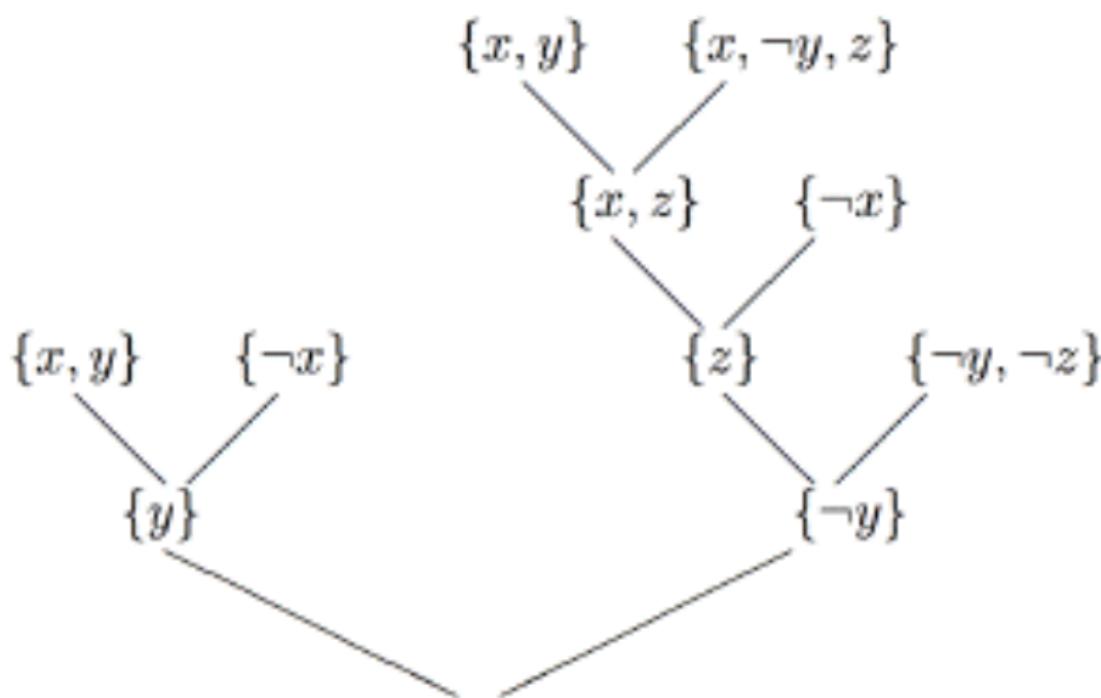
- Bisher wurde noch für kein coNP-schweres Problem ein polynomielles Zertifikat gefunden
- Es konnte noch für kein NP-schweres Problem nachgewiesen werden, dass es in coNP liegt
- Es konnte noch für kein Problem aus  $NP \cap coNP$  NP-schwere bzw. coNP-schwere nachgewiesen werden

# 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

## Resolution Beispiel

$$F_3 = \{\{x, y\}, \{x, \neg y, z\}, \{\neg x\}, \{\neg y, \neg z\}\}$$



# 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  $(1.49^{0.01})^n$  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
  - $\Rightarrow$  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 (TODO: P-vollständig?) wären vergleichbar schwer, es gäbe keine Klasse NPI

# 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. ( $\rightarrow$  Shor-Algorithmus)
- Andererseits: Passwort raten, leicht gemacht?
  - Gibt es ein Passphrase der Länge  $\leq n$  die diese Datei entschlüsselt?  $\in \text{NP}$

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

- Aus  $P = NP$  folgt automatisch  $coNP = NP$ 
  - Umkehrung gilt nicht automatisch
- Allerdings folgt aus  $coNP \neq NP$  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  $L \in P$
  - da  $P$  unter Komplementbildung abgeschlossen ist gilt  $\bar{L} \in P$
  - da gilt  $P = NP$  gilt  $\bar{L} \in NP$
  - daraus würde folgen  $coNP = NP$  was ein Widerspruch ist

# Probleme zwischen P und NP-Vollständig

- Gilt  $P \neq NP$  so gibt es eine Klasse NP-intermediate (NPI) für die gilt:
  - $A \in NPI$  gdw.  $A \in NP$ ,  $A \notin P$  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

# 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)

## Umgang mit NP-vollständigen Problemen



Abbildung 6:<http://everfalling.deviantart.com/art/DON-T-PANIC-15975789>

# Umgang mit NP-vollständigen Problemen

- Existieren vielleicht gute Näherungslösungen?
- Ist der Worst-Case wirklich wahrscheinlich?
- Gibt es andere Modelierungen in P?
- Ist  $n$  wirklich so groß, dass NP-Vollständigkeit ein Problem darstellt?

## Quellenangaben

- - [http://de.wikipedia.org/wiki/P\\_%28Komplexit%C3%A4tsklasse%29](http://de.wikipedia.org/wiki/P_%28Komplexit%C3%A4tsklasse%29)
  - <http://de.wikipedia.org/wiki/Turingmaschine>
  - <http://de.wikipedia.org/wiki/Polynomialzeit>
  - [https://complexityzoo.uwaterloo.ca/Complexity\\_Zoo:P#p](https://complexityzoo.uwaterloo.ca/Complexity_Zoo:P#p)
  - [http://de.wikipedia.org/wiki/Lineare\\_Optimierung](http://de.wikipedia.org/wiki/Lineare_Optimierung)
  - <http://de.wikipedia.org/wiki/AKS-Primzahltest>
  - <http://de.wikipedia.org/wiki/Horn-Formel>
- - [http://de.wikipedia.org/wiki/Reduktion\\_%28Theoretische\\_Informatik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Reduktion_%28Theoretische_Informatik%29)
  - <http://en.wikipedia.org/wiki/Co-NP>
  - [https://complexityzoo.uwaterloo.ca/Complexity\\_Zoo:C#comp](https://complexityzoo.uwaterloo.ca/Complexity_Zoo:C#comp)
  - <https://homepages.uni-tuebingen.de//student/monika.gehweiler/Applets/html/resolutionIndex.html>

- Buch: Aussagenlogik: Deduktion und Algorithmen: Deduktion und Algorithmen von Theodor Lettmann (<https://books.google.de/books?id=6ZGoBgAAQBAJ&pg=PA150&lpg=>)
- <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://www.cosy.sbg.ac.at/~held/teaching/wiss_arbeiten/slides_02-03/kmrr.pdf)
- <http://hackvalue.de/files/tsp.pdf>
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Satz\\_von\\_Ladner](http://de.wikipedia.org/wiki/Satz_von_Ladner)
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Primfaktorzerlegung>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/NP-intermediate>