

# Theoretische Informatik II

## Einheit 6

### Theoretische Informatik im Rückblick



1. Berechenbarkeitsmodelle
2. Berechenbarkeitstheorie
3. Komplexitätstheorie
4. Methodik des AufgabenlöSENS

## ● Turingmaschinen

- Endlicher Automat mit unendlichem Band als Gedächtnis
- Beschreibung durch Zustandsüberführungstabellen
- Semantik definiert über Konfigurationen
- Berechenbarkeitsbegriff übertragbar von Wörtern auf Zahlen, Mengen, ...

## ● Turingmaschinen

- Endlicher Automat mit unendlichem Band als Gedächtnis
- Beschreibung durch Zustandsüberführungstabellen
- Semantik definiert über Konfigurationen
- Berechenbarkeitsbegriff übertragbar von Wörtern auf Zahlen, Mengen, ...
- Akzeptierende und berechnende Variante sind äquivalent
- Nichtdeterministische Variante mit exponentiellem Aufwand simulierbar
- Varianten: Datenregister, Mehrere Spuren, Mehrere Bänder, Halbseitiges Band, Beschränktes Alphabet ... alle äquivalent

## ● Turingmaschinen

- Endlicher Automat mit unendlichem Band als Gedächtnis
- Beschreibung durch Zustandsüberführungstabellen
- Semantik definiert über Konfigurationen
- Berechenbarkeitsbegriff übertragbar von Wörtern auf Zahlen, Mengen, ...
- Akzeptierende und berechnende Variante sind äquivalent
- Nichtdeterministische Variante mit exponentiellem Aufwand simulierbar
- Varianten: Datenregister, Mehrere Spuren, Mehrere Bänder, Halbseitiges Band, Beschränktes Alphabet ... alle äquivalent
- **Turingmaschinen erkennen genau die Typ-0 Sprachen**

## ● Turingmaschinen

- Endlicher Automat mit unendlichem Band als Gedächtnis
- Beschreibung durch Zustandsüberführungstabellen
- Semantik definiert über Konfigurationen
- Berechenbarkeitsbegriff übertragbar von Wörtern auf Zahlen, Mengen, ...
- Akzeptierende und berechnende Variante sind äquivalent
- Nichtdeterministische Variante mit exponentiellem Aufwand simulierbar
- Varianten: Datenregister, Mehrere Spuren, Mehrere Bänder, Halbseitiges Band, Beschränktes Alphabet ... alle äquivalent
- **Turingmaschinen erkennen genau die Typ-0 Sprachen**

## ● Rekursive Funktionen

- Mathematischer Funktionenkalkül auf Zahlen
- Anwendung von Operationen  $(\circ, Pr, \mu)$  auf Grundfunktionen  $(s, pr_k^n, c_k^n)$
- Alle Programmier Techniken simulierbar
- Primitiv-rekursive Funktionen als wichtige Teilklasse
- **Äquivalent zu Turing-berechenbaren Funktionen**

- **$\lambda$ -Kalkül**

- Einfaches mathematisches Modell funktionaler Programmiersprachen
- Funktionsdefinition, -anwendung und -auswertung
- Datenstrukturen wie Zahlen, Listen, Boole'sche Operatoren codierbar
- **Äquivalent zu  $\mu$ -rekursiven Funktionen**

# BERECHENBARKEITSMODELLE

## ● $\lambda$ -Kalkül

- Einfaches mathematisches Modell funktionaler Programmiersprachen
- Funktionsdefinition, -anwendung und -auswertung
- Datenstrukturen wie Zahlen, Listen, Boole'sche Operatoren codierbar
- **Äquivalent zu  $\mu$ -rekursiven Funktionen**

## ● Arithmetische Repräsentierbarkeit

- Beweisbasiertes Modell für logische Programmiersprachen
- Formeln repräsentieren Ein-/Ausgabeverhalten von Funktionen
- **Einfaches Modell, äquivalent zu rekursiven Funktionen**

# BERECHENBARKEITSMODELLE

## ● $\lambda$ -Kalkül

- Einfaches mathematisches Modell funktionaler Programmiersprachen
- Funktionsdefinition, -anwendung und -auswertung
- Datenstrukturen wie Zahlen, Listen, Boole'sche Operatoren codierbar
- **Äquivalent zu  $\mu$ -rekursiven Funktionen**

## ● Arithmetische Repräsentierbarkeit

- Beweisbasiertes Modell für logische Programmiersprachen
- Formeln repräsentieren Ein-/Ausgabeverhalten von Funktionen
- **Einfaches Modell, äquivalent zu rekursiven Funktionen**

## ● Weitere Modelle sind ebenfalls äquivalent

- Abakus, Registermaschinen, Mini-Pascal, Markov-Algorithmen, ...

# BERECHENBARKEITSMODELLE

## ● $\lambda$ -Kalkül

- Einfaches mathematisches Modell funktionaler Programmiersprachen
- Funktionsdefinition, -anwendung und -auswertung
- Datenstrukturen wie Zahlen, Listen, Boole'sche Operatoren codierbar
- **Äquivalent zu  $\mu$ -rekursiven Funktionen**

## ● **Arithmetische Repräsentierbarkeit**

- Beweisbasiertes Modell für logische Programmiersprachen
- Formeln repräsentieren Ein-/Ausgabeverhalten von Funktionen
- **Einfaches Modell, äquivalent zu rekursiven Funktionen**

## ● **Weitere Modelle sind ebenfalls äquivalent**

- Abakus, Registermaschinen, Mini-Pascal, Markov-Algorithmen, ...

## ● **Church'sche These**

- **Intuitiv berechenbare Funktionen sind Turing-berechenbar**
- Unbeweisbare aber praktisch sehr nützliche Arbeitshypothese

- **Berechenbare Funktionen als Oberbegriff**
  - Charakteristische Funktion erklärt Aufzählbarkeit & Entscheidbarkeit

- **Berechenbare Funktionen als Oberbegriff**
  - Charakteristische Funktion erklärt Aufzählbarkeit & Entscheidbarkeit
- **Berechenbarkeit ist axiomatisierbar**
  - Berechenbare Funktionen & Rechenzeitfunktion sind numerierbar
  - Es gibt eine universelle berechenbare Funktion
  - Programme sind effektiv kombinierbar
  - Rechenzeit ist entscheidbar

- **Berechenbare Funktionen als Oberbegriff**
  - Charakteristische Funktion erklärt Aufzählbarkeit & Entscheidbarkeit
- **Berechenbarkeit ist axiomatisierbar**
  - Berechenbare Funktionen & Rechenzeitfunktion sind numerierbar
  - Es gibt eine universelle berechenbare Funktion
  - Programme sind effektiv kombinierbar
  - Rechenzeit ist entscheidbar
- **Aufzählbarkeit & Entscheidbarkeit**
  - Viele äquivalente Charakterisierungen von Aufzählbarkeit
  - $M$  entscheidbar  $\Leftrightarrow M$  und  $\overline{M}$  aufzählbar
  - Abschlußigenschaften: Vereinigung, Durchschnitt, Urbild  
Für Entscheidbarkeit auch Komplement und Differenz

- **Berechenbare Funktionen als Oberbegriff**
  - Charakteristische Funktion erklärt Aufzählbarkeit & Entscheidbarkeit
- **Berechenbarkeit ist axiomatisierbar**
  - Berechenbare Funktionen & Rechenzeitfunktion sind numerierbar
  - Es gibt eine universelle berechenbare Funktion
  - Programme sind effektiv kombinierbar
  - Rechenzeit ist entscheidbar
- **Aufzählbarkeit & Entscheidbarkeit**
  - Viele äquivalente Charakterisierungen von Aufzählbarkeit
  - $M$  entscheidbar  $\Leftrightarrow M$  und  $\overline{M}$  aufzählbar
  - Abschlußeigenschaften: Vereinigung, Durchschnitt, Urbild  
Für Entscheidbarkeit auch Komplement und Differenz
- **Beweistechniken für unlösbare Probleme**
  - Diagonalisierung: Unendliche Konstruktion von Gegenbeispielen
  - Monotonieargumente: Widersprüche im Wachstumsverhalten
  - Problemreduktion: Abbildung auf bekanntes unlösbares Problem
  - Satz von Rice: keine extensionale Eigenschaft ist entscheidbar

## ● Komplexitätsmaße

- Zeit- und Platzkomplexität relativ zur Größe der Eingabe
- Vereinfachte Komplexitätsabschätzungen genügen
- Asymptotische Meßgröße  $\mathcal{O}(f)$  für worst-case Analyse
- Obergrenze für Handhabbarkeit ist polynomielles Wachstum

- **Komplexitätsmaße**

- Zeit- und Platzkomplexität relativ zur Größe der Eingabe
- Vereinfachte Komplexitätsabschätzungen genügen
- Asymptotische Meßgröße  $\mathcal{O}(f)$  für worst-case Analyse
- Obergrenze für Handhabbarkeit ist polynomielles Wachstum

- **Analyse der Komplexität von Algorithmen**

- Suchverfahren - lineare und logarithmische Verfahren
- Sortierverfahren - quadratische und  $\mathcal{O}(n * \log_2 n)$  Algorithmen
- Travelling Salesman – nur exponentiell bekannt

# KOMPLEXITÄTSTHEORIE

## ● Komplexitätsmaße

- Zeit- und Platzkomplexität relativ zur Größe der Eingabe
- Vereinfachte Komplexitätsabschätzungen genügen
- Asymptotische Meßgröße  $\mathcal{O}(f)$  für worst-case Analyse
- Obergrenze für Handhabbarkeit ist polynomielles Wachstum

## ● Analyse der Komplexität von Algorithmen

- Suchverfahren - lineare und logarithmische Verfahren
- Sortierverfahren - quadratische und  $\mathcal{O}(n * \log_2 n)$  Algorithmen
- Travelling Salesman – nur exponentiell bekannt

## ● Komplexität von Problemen

- Untere Schranken für Komplexität von Sortieren:  $\mathcal{O}(n * \log_2 n)$
- Nichtdeterministische Maschinen lösen Suchprobleme effizient
- Komplexitätsklassen:  $..LOGSPACE \subseteq \mathcal{P} \subseteq \mathcal{NP} \subseteq PSPACE \subseteq ..$

$\mathcal{P} \stackrel{?}{=} \mathcal{NP}$  ist die wichtigste noch offene Frage

# NICHT-HANDHABARE PROBLEME

- $\mathcal{NP}$ -vollständigkeit

- Die schwierigste Klasse innerhalb von  $\mathcal{NP}$
- Erklärbar durch polynomielle Reduzierbarkeit  $\leq_p$

# NICHT-HANDHABBARE PROBLEME

## ● $\mathcal{NP}$ -vollständigkeit

- Die schwierigste Klasse innerhalb von  $\mathcal{NP}$
- Erklärbar durch polynomielle Reduzierbarkeit  $\leq_p$
- **Satz von Cook**: Expliziter  $\mathcal{NP}$ -vollständigkeitsbeweis für  $SAT$
- Sonstige Beweise via  $\leq_p$ :  $3SAT$ ,  $CLIQUE$ ,  $VC$ ,  $KP$ ,  $GC$ , ...

## ● $\mathcal{NP}$ -vollständigkeit

- Die schwierigste Klasse innerhalb von  $\mathcal{NP}$
- Erklärbar durch polynomielle Reduzierbarkeit  $\leq_p$
- **Satz von Cook**: Expliziter  $\mathcal{NP}$ -vollständigkeitsbeweis für  $SAT$
- Sonstige Beweise via  $\leq_p$ :  $3SAT$ ,  $CLIQUE$ ,  $VC$ ,  $KP$ ,  $GC$ , ...
- Klassen jenseits von  $\mathcal{NP}$ :  $co\text{-}\mathcal{NP}$ ,  $PSPACE$ -vollständig, ...

# NICHT-HANDHABBARE PROBLEME

## ● $\mathcal{NP}$ -vollständigkeit

- Die schwierigste Klasse innerhalb von  $\mathcal{NP}$
- Erklärbar durch polynomielle Reduzierbarkeit  $\leq_p$
- **Satz von Cook**: Expliziter  $\mathcal{NP}$ -vollständigkeitsbeweis für  $SAT$
- Sonstige Beweise via  $\leq_p$ :  $3SAT$ ,  $CLIQUE$ ,  $VC$ ,  $KP$ ,  $GC$ , ...
- Klassen jenseits von  $\mathcal{NP}$ :  $co\text{-}\mathcal{NP}$ ,  $PSPACE$ -vollständig, ...

## ● Grenzüberschreitung ist möglich

# NICHT-HANDHABBARE PROBLEME

## ● $\mathcal{NP}$ -vollständigkeit

- Die schwierigste Klasse innerhalb von  $\mathcal{NP}$
- Erklärbar durch polynomielle Reduzierbarkeit  $\leq_p$
- **Satz von Cook**: Expliziter  $\mathcal{NP}$ -vollständigkeitsbeweis für  $SAT$
- Sonstige Beweise via  $\leq_p$ :  $3SAT$ ,  $CLIQUE$ ,  $VC$ ,  $KP$ ,  $GC$ , ...
- Klassen jenseits von  $\mathcal{NP}$ :  $co\text{-}\mathcal{NP}$ ,  $PSPACE$ -vollständig, ...

## ● Grenzüberschreitung ist möglich

- Pseudopolynomielle Algorithmen, wenn es an großen Zahlen liegt
- Approximationsalgorithmen, wenn suboptimale Lösung akzeptabel
- Probabilistische Algorithmen reduzieren Fehlerwahrscheinlichkeit

# FRAGEN ?

**Tutorium, morgen 15:15-16:40**

# WIE LÖST MAN AUFGABEN EFFEKTIV UND KORREKT?

In der Theorie läuft nicht alles nach Schema,  
aber Methodik führt dennoch zu mehr Erfolg

# WIE LÖST MAN AUFGABEN EFFEKTIV UND KORREKT?

In der Theorie läuft nicht alles nach Schema,  
aber Methodik führt dennoch zu mehr Erfolg

## 1. Voraussetzungen präzisieren (essentiell für alles Weitere)

- Welche Begriffe sind zum Verständnis der Aufgabe erforderlich
- Was ist eigentlich genau zu tun?

# WIE LÖST MAN AUFGABEN EFFEKTIV UND KORREKT?

In der Theorie läuft nicht alles nach Schema, aber Methodik führt dennoch zu mehr Erfolg

## 1. Voraussetzungen präzisieren (essentiell für alles Weitere)

- Welche Begriffe sind zum Verständnis der Aufgabe erforderlich
- Was ist eigentlich genau zu tun?

## 2. Lösungsweg entwickeln und konkretisieren

- Welche Einzelschritte benötigt man, um das Problem zu lösen?
- Lösungen der einzelnen Schritte knapp, aber präzise skizzieren

# WIE LÖST MAN AUFGABEN EFFEKTIV UND KORREKT?

In der Theorie läuft nicht alles nach Schema, aber Methodik führt dennoch zu mehr Erfolg

- 1. Voraussetzungen präzisieren** (essentiell für alles Weitere)
  - Welche Begriffe sind zum Verständnis der Aufgabe erforderlich
  - Was ist eigentlich genau zu tun?
- 2. Lösungsweg entwickeln und konkretisieren**
  - Welche Einzelschritte benötigt man, um das Problem zu lösen?
  - Lösungen der einzelnen Schritte knapp, aber präzise skizzieren
- 3. Argumente zu Lösung zusammenfassen**
  - Ergebnis sollte ein zusammenhängendes schlüssiges Argument sein
    - Lösungen der Einzelschritte Gesamtergebnis zusammenführen
    - Zusammenfassend hinschreiben, was jetzt insgesamt gezeigt ist

# WIE LÖST MAN AUFGABEN EFFEKTIV UND KORREKT?

In der Theorie läuft nicht alles nach Schema, aber Methodik führt dennoch zu mehr Erfolg

## 1. Voraussetzungen präzisieren (essentiell für alles Weitere)

- Welche Begriffe sind zum Verständnis der Aufgabe erforderlich
- Was ist eigentlich genau zu tun?

## 2. Lösungsweg entwickeln und konkretisieren

- Welche Einzelschritte benötigt man, um das Problem zu lösen?
- Lösungen der einzelnen Schritte knapp, aber präzise skizzieren

## 3. Argumente zu Lösung zusammenfassen

- Ergebnis sollte ein zusammenhängendes schlüssiges Argument sein
  - Lösungen der Einzelschritte Gesamtergebnis zusammenführen
  - Zusammenfassend hinschreiben, was jetzt insgesamt gezeigt ist
- Auf lesbaren und verständlichen Text achten

Formeln & Textfragmente ohne erkennbaren Sinn aneinanderzureihen ist unakzeptabel

# WIE LÖST MAN AUFGABEN EFFEKTIV UND KORREKT?

In der Theorie läuft nicht alles nach Schema, aber Methodik führt dennoch zu mehr Erfolg

## 1. Voraussetzungen präzisieren (essentiell für alles Weitere)

- Welche Begriffe sind zum Verständnis der Aufgabe erforderlich
- Was ist eigentlich genau zu tun?

## 2. Lösungsweg entwickeln und konkretisieren

- Welche Einzelschritte benötigt man, um das Problem zu lösen?
- Lösungen der einzelnen Schritte knapp, aber präzise skizzieren

## 3. Argumente zu Lösung zusammenfassen

- Ergebnis sollte ein zusammenhängendes schlüssiges Argument sein
  - Lösungen der Einzelschritte Gesamtergebnis zusammenführen
  - Zusammenfassend hinschreiben, was jetzt insgesamt gezeigt ist
- Auf lesbaren und verständlichen Text achten

Formeln & Textfragmente ohne erkennbaren Sinn aneinanderzureihen ist unakzeptabel

Beispiele im Anhang dieser Folien

## BEISPIEL I: PRIMITIV-REKURSIVE FUNKTIONEN

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

# BEISPIEL I: PRIMITIV-REKURSIVE FUNKTIONEN

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

## 1. Voraussetzungen präzisieren

# BEISPIEL I: PRIMITIV-REKURSIVE FUNKTIONEN

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

## 1. Voraussetzungen präzisieren

- $h : \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$  ist primitiv-rekursiv, wenn  $h$  aus primitiv-rekursiven Funktionen durch Komposition oder primitive Rekursion entsteht

# BEISPIEL I: PRIMITIV-REKURSIVE FUNKTIONEN

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

## 1. Voraussetzungen präzisieren

- $h: \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$  ist primitiv-rekursiv, wenn  $h$  aus primitiv-rekursiven Funktionen durch Komposition oder primitive Rekursion entsteht
- Die Grundfunktionen  $s$ ,  $pr_k^n$ , und  $c_k^n$  sind primitiv-rekursiv

# BEISPIEL I: PRIMITIV-REKURSIVE FUNKTIONEN

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

## 1. Voraussetzungen präzisieren

- $h: \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$  ist primitiv-rekursiv, wenn  $h$  aus primitiv-rekursiven Funktionen durch Komposition oder primitive Rekursion entsteht
- Die Grundfunktionen  $s$ ,  $pr_k^n$ , und  $c_k^n$  sind primitiv-rekursiv
- Bekannte primitiv-rekursive Funktionen aus Vorlesung und Übungen
  - $p$ ,  $sub$ ,  $mul$ ,  $exp$ , ...
  - Fallunterscheidung, Summierung, beschränkte Minimierung, ...

# BEISPIEL I: PRIMITIV-REKURSIVE FUNKTIONEN

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

## 1. Voraussetzungen präzisieren

- $h: \mathbb{N}^k \rightarrow \mathbb{N}$  ist primitiv-rekursiv, wenn  $h$  aus primitiv-rekursiven Funktionen durch Komposition oder primitive Rekursion entsteht
- Die Grundfunktionen  $s$ ,  $pr_k^n$ , und  $c_k^n$  sind primitiv-rekursiv
- Bekannte primitiv-rekursive Funktionen aus Vorlesung und Übungen
  - $p$ ,  $sub$ ,  $mul$ ,  $exp$ , ...
  - Fallunterscheidung, Summierung, beschränkte Minimierung, ...
- Was ist zu tun?

**Drücke  $h$  durch obige Funktionen und Operatoren aus**

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

### 2. Lösungsweg konkretisieren

– Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

- Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben
  - Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

- Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben
  - Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
  - Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

- Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben
  - Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
  - Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
  - Versuche Schema der primitiven Rekursion
- $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

- Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben
  - Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
  - Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
  - Versuche Schema der primitiven Rekursion
- $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$
- Dabei muß  $f: \mathbb{N}^0 \rightarrow \mathbb{N}$  und  $g: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  sein, also fällt  $\vec{x}$  ganz weg.

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

- Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben
  - Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
  - Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
  - Versuche Schema der primitiven Rekursion
- $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$
- Dabei muß  $f: \mathbb{N}^0 \rightarrow \mathbb{N}$  und  $g: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  sein, also fällt  $\vec{x}$  ganz weg.
- Eingesetzt:  $h(0) = 0! = 1 = f()$ 
$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1) * y! = (y+1) * h(y) = g(y, h(y))$$

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

– Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben

- Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
- Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
- Versuche Schema der primitiven Rekursion

–  $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$

– Dabei muß  $f: \mathbb{N}^0 \rightarrow \mathbb{N}$  und  $g: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  sein, also fällt  $\vec{x}$  ganz weg.

– Eingesetzt:  $h(0) = 0! = 1 = f()$

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

– Es folgt  $f() = 1$  also

und  $g(y, z) = (y+1)*z = mul(s(y), z)$ , also  $f = c_1^0$   
 $g = mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2)$

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

– Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben

- Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
- Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
- Versuche Schema der primitiven Rekursion

–  $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$

– Dabei muß  $f: \mathbb{N}^0 \rightarrow \mathbb{N}$  und  $g: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  sein, also fällt  $\vec{x}$  ganz weg.

– Eingesetzt:  $h(0) = 0! = 1 = f()$

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

– Es folgt  $f() = 1$  also

$$f = c_1^0$$

und  $g(y, z) = (y+1)*z = mul(s(y), z)$ , also  $g = mul \circ (sopr_1^2, pr_2^2)$

## 3. Argumente zu Lösung zusammenfassen

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

– Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben

- Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
- Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
- Versuche Schema der primitiven Rekursion

–  $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$

– Dabei muß  $f: \mathbb{N}^0 \rightarrow \mathbb{N}$  und  $g: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  sein, also fällt  $\vec{x}$  ganz weg.

– Eingesetzt:  $h(0) = 0! = 1 = f()$

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1) * y! = (y+1) * h(y) = g(y, h(y))$$

– Es folgt  $f() = 1$  also

$$f = c_1^0$$

und  $g(y, z) = (y+1) * z = mul(s(y), z)$ , also  $g = mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2)$

## 3. Argumente zu Lösung zusammenfassen

– Da  $f$  und  $g$  primitiv rekursiv sind, folgt daß  $h$  primitiv-rekursiv ist

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

– Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben

- Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
- Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
- Versuche Schema der primitiven Rekursion

–  $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$

– Dabei muß  $f: \mathbb{N}^0 \rightarrow \mathbb{N}$  und  $g: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  sein, also fällt  $\vec{x}$  ganz weg.

– Eingesetzt:  $h(0) = 0! = 1 = f()$

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

– Es folgt  $f() = 1$  also

$$f = c_1^0$$

und  $g(y, z) = (y+1)*z = mul(s(y), z)$ , also  $g = mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2)$

## 3. Argumente zu Lösung zusammenfassen

– Da  $f$  und  $g$  primitiv rekursiv sind, folgt daß  $h$  primitiv-rekursiv ist

– Operatorenschema:  $h = Pr[c_1^0, (mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2))]$

# BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

## 2. Lösungsweg konkretisieren

– Einzelschritte: versuche  $h$  durch ein Operatorenschema zu beschreiben

- Einfache Komposition bekannter Funktionen reicht nicht
- Fallunterscheidung und Minimierung passen nicht
- Versuche Schema der primitiven Rekursion

–  $h = Pr[f, g]$  gilt, wenn  $h(\vec{x}, 0) = f(\vec{x})$ ,  $h(\vec{x}, y+1) = g(\vec{x}, y, h(\vec{x}, y))$

– Dabei muß  $f: \mathbb{N}^0 \rightarrow \mathbb{N}$  und  $g: \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$  sein, also fällt  $\vec{x}$  ganz weg.

– Eingesetzt:  $h(0) = 0! = 1 = f()$

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1) * y! = (y+1) * h(y) = g(y, h(y))$$

– Es folgt  $f() = 1$  also

$$f = c_1^0$$

und  $g(y, z) = (y+1) * z = mul(s(y), z)$ , also  $g = mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2)$

## 3. Argumente zu Lösung zusammenfassen

– Da  $f$  und  $g$  primitiv rekursiv sind, folgt daß  $h$  primitiv-rekursiv ist

– Operatorenschema:  $h = Pr[c_1^0, (mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2))]$

– Wir setzen ein:  $mul = Pr[c_1^0, (add \circ (pr_1^3, pr_2^3))]$  und  $add = Pr[pr_1^1, s \circ pr_3^3]$

$$h = Pr[c_1^0, (Pr[c_1^0, (Pr[pr_1^1, s \circ pr_3^3] \circ (pr_1^3, pr_2^3))] \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2))]$$

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

**Kurze, aufgeschriebene Lösung**

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

- Wir beschreiben  $h$  durch das Schema der primitiven Rekursion

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

- Wir beschreiben  $h$  durch das Schema der primitiven Rekursion
- Es ist  $h(0) = 0! = 1 = f()$ ,

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1) * y! = (y+1) * h(y) = g(y, h(y))$$

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

- Wir beschreiben  $h$  durch das Schema der primitiven Rekursion
- Es ist  $h(0) = 0! = 1 = f()$ ,

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

- Es folgt  $f() = 1$ , also  $f = c_1^0$
- und  $g(y, z) = (y+1)*z = mul(s(y), z)$ , also  $g = mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2)$

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

– Wir beschreiben  $h$  durch das Schema der primitiven Rekursion

– Es ist  $h(0) = 0! = 1 = f()$ ,

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

– Es folgt  $f() = 1$ , also

$$f = c_1^0$$

und  $g(y, z) = (y+1)*z = \text{mul}(s(y), z)$ , also  $g = \text{mul} \circ (\text{sopr}_1^2, \text{pr}_2^2)$

– Da  $f$  und  $g$  primitiv rekursiv sind, folgt daß  $h$  primitiv-rekursiv ist

---

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

- Wir beschreiben  $h$  durch das Schema der primitiven Rekursion
- Es ist  $h(0) = 0! = 1 = f()$ ,

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

- Es folgt  $f() = 1$ , also  $f = c_1^0$   
und  $g(y, z) = (y+1)*z = \text{mul}(s(y), z)$ , also  $g = \text{mul} \circ (\text{sopr}_1^2, \text{pr}_2^2)$
- Da  $f$  und  $g$  primitiv rekursiv sind, folgt daß  $h$  primitiv-rekursiv ist

- 
- Operatorenschema:  $h = \text{Pr}[c_1^0, (\text{mul} \circ (\text{sopr}_1^2, \text{pr}_2^2))]$

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

– Wir beschreiben  $h$  durch das Schema der primitiven Rekursion

– Es ist  $h(0) = 0! = 1 = f()$ ,

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

– Es folgt  $f() = 1$ , also

$$f = c_1^0$$

und  $g(y, z) = (y+1)*z = \text{mul}(s(y), z)$ , also  $g = \text{mul} \circ (\text{sopr}_1^2, \text{pr}_2^2)$

– Da  $f$  und  $g$  primitiv rekursiv sind, folgt daß  $h$  primitiv-rekursiv ist

---

– Operatorenschema:  $h = \text{Pr}[c_1^0, (\text{mul} \circ (\text{sopr}_1^2, \text{pr}_2^2))]$

– Nach Einsetzen

$$h = \text{Pr}[c_1^0, (\text{Pr}[c_0^1, (\text{Pr}[\text{pr}_1^1, \text{sopr}_3^3] \circ (\text{pr}_1^3, \text{pr}_3^3))] \circ (\text{sopr}_1^2, \text{pr}_2^2))]$$

## BEISPIEL I: $n!$ IST PRIMITIV-REKURSIV

Zeige, daß  $h : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $h(n) = n!$  primitiv rekursiv ist.  
Stelle  $h$  explizit durch Operatoren und Grundfunktionen dar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

- Wir beschreiben  $h$  durch das Schema der primitiven Rekursion
- Es ist  $h(0) = 0! = 1 = f()$ ,

$$h(y+1) = (y+1)! = (y+1)*y! = (y+1)*h(y) = g(y, h(y))$$

- Es folgt  $f() = 1$ , also  $f = c_1^0$   
und  $g(y, z) = (y+1)*z = mul(s(y), z)$ , also  $g = mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2)$
- Da  $f$  und  $g$  primitiv rekursiv sind, folgt daß  $h$  primitiv-rekursiv ist

- 
- Operatorenschema:  $h = Pr[c_1^0, (mul \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2))]$

- Nach Einsetzen

$$h = Pr[c_1^0, (Pr[c_0^1, (Pr[pr_1^1, s \circ pr_3^3] \circ (pr_1^3, pr_3^3))] \circ (s \circ pr_1^2, pr_2^2))]$$

In vielen Fällen greift ein anderes Schema (Komposition, Minimierung, etc.) besser

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### 1. Voraussetzungen präzisieren

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### 1. Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist entscheidbar, wenn  $\chi_L$  berechenbar ist

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### 1. Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist entscheidbar, wenn  $\chi_L$  berechenbar ist
- Charakteristische Funktion  $\chi_L(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \vec{x} \in L, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### 1. Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist entscheidbar, wenn  $\chi_L$  berechenbar ist
- Charakteristische Funktion  $\chi_L(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \vec{x} \in L, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
- $\varphi$ : Numerierung berechenbarer Funktionen,  
Für jede berechenbare Funktion  $f$  gibt es in  $j$  mit  $f = \varphi_j$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### 1. Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist entscheidbar, wenn  $\chi_L$  berechenbar ist
- Charakteristische Funktion  $\chi_L(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \vec{x} \in L, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
- $\varphi$ : Numerierung berechenbarer Funktionen,  
Für jede berechenbare Funktion  $f$  gibt es in  $j$  mit  $f = \varphi_j$
- Zeige, daß die Annahme “ $RG_\varphi$  ist entscheidbar” zum Widerspruch führt

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### 1. Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist entscheidbar, wenn  $\chi_L$  berechenbar ist
- Charakteristische Funktion  $\chi_L(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \vec{x} \in L, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
- $\varphi$ : Numerierung berechenbarer Funktionen,  
Für jede berechenbare Funktion  $f$  gibt es in  $j$  mit  $f = \varphi_j$
- Zeige, daß die Annahme “ $RG_\varphi$  ist entscheidbar” zum Widerspruch führt
- Mögliche Techniken: Diagonalisierung, Monotonieargumente,  
Problemreduktion, Satz von Rice

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelsschritte:
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  ist berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
-

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:**
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:**
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

Es gilt  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i)=1$ , also  $f(i) = \mu_z[\chi_{RG_\varphi}(i, i)=0]+i$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

Es gilt  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i)=1$ , also  $f(i) = \mu_z[\chi_{RG_\varphi}(i, i)=0]+i$

Da  $f$  berechenbar ist, gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:**
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

Es gilt  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i)=1$ , also  $f(i) = \mu_z[\chi_{RG_\varphi}(i, i)=0]+i$

Da  $f$  berechenbar ist, gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

zu 4.: Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

Es gilt  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i)=1$ , also  $f(i) = \mu_z[\chi_{RG_\varphi}(i, i)=0]+i$

Da  $f$  berechenbar ist, gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

zu 4.: Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi$

$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n) = j$  (nach Definition von  $RG_\varphi$ )

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:**
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

Es gilt  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i)=1$ , also  $f(i) = \mu_z[\chi_{RG_\varphi}(i, i)=0]+i$

Da  $f$  berechenbar ist, gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

zu 4.: Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi$

$$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n) = j$$

(nach Definition von  $RG_\varphi$ )

$$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. f(n) = j$$

( $f = \varphi_j$ )

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:**
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich
- 

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

Es gilt  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ , also  $f(i) = \mu_z[\chi_{RG_\varphi}(i, i) = 0] + i$

Da  $f$  berechenbar ist, gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

zu 4.: Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi$

$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n) = j$  (nach Definition von  $RG_\varphi$ )

$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. f(n) = j$  ( $f = \varphi_j$ )

$\Leftrightarrow (j, j) \notin RG_\varphi$  (nach Konstruktion von  $f$ )

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

### 2. Lösungsweg konkretisieren: Diagonalisierung

- Einzelschritte:**
1. Annahme  $RG_\varphi$  ist entscheidbar
  2. Konstruiere eine Diagonalfunktion  $f$  mittels  $\chi_{RG_\varphi}$
  3. Zeige:  $f$  berechenbar ist, also  $f = \varphi_j$  für ein  $j$
  4. Zeige:  $f$  ist auf seinem eigenen Index  $j$  widersprüchlich

---

zu 2.: definiere  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$  Schlüsselidee für Widerspruch auf  $(j, j)$

zu 3.:  $f$  berechenbar, da Fallunterscheidung mit Test  $(i, i) \in RG_\varphi$

Es gilt  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ , also  $f(i) = \mu_z[\chi_{RG_\varphi}(i, i) = 0] + i$

Da  $f$  berechenbar ist, gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

zu 4.: Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi$

$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n) = j$  (nach Definition von  $RG_\varphi$ )

$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. f(n) = j$  ( $f = \varphi_j$ )

$\Leftrightarrow (j, j) \notin RG_\varphi$  (nach Konstruktion von  $f$ )

Dies ist ein Widerspruch. **Also kann  $RG_\varphi$  nicht entscheidbar sein**

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

**Kurze, aufgeschriebene Lösung**

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

$f$  ist berechenbar, da  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ .

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

Zeige:  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

$f$  ist berechenbar, da  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ .

Damit gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

**Zeige:**  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

$f$  ist berechenbar, da  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ .

Damit gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

**Zeige:**  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n)=y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

$f$  ist berechenbar, da  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ .

Damit gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n)=j$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

**Zeige:**  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

$f$  ist berechenbar, da  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ .

Damit gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n) = j \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. f(n) = j$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

**Zeige:**  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

$f$  ist berechenbar, da  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ .

Damit gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n) = j \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. f(n) = j \Leftrightarrow (j, j) \notin RG_\varphi$

## BEISPIEL II: DIAGONALISIERUNG

**Zeige:**  $RG_\varphi = \{(i, y) \mid \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_i(n) = y\}$  ist nicht entscheidbar

### Kurze, aufgeschriebene Lösung

Wir nehmen an  $RG_\varphi$  sei entscheidbar.

Dann ist die charakteristische Funktion  $\chi_{RG_\varphi}$  berechenbar.

Wir konstruieren mit  $\chi_{RG_\varphi}$  eine berechenbare Funktion  $f$ , die sich auf ihrer eigenen Gödelnummer widersprüchlich verhält.

Es sei  $f(i) = \begin{cases} \perp & \text{falls } (i, i) \in RG_\varphi \\ i & \text{sonst} \end{cases}$

$f$  ist berechenbar, da  $(i, i) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \chi_{RG_\varphi}(i, i) = 1$ .

Damit gibt es einen Index  $j$  mit  $f = \varphi_j$

Wir betrachten das Verhalten von  $f$  auf  $j$

Es gilt  $(j, j) \in RG_\varphi \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. \varphi_j(n) = j \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N}. f(n) = j \Leftrightarrow (j, j) \notin RG_\varphi$

Dies ist ein Widerspruch. **Also kann  $RG_\varphi$  nicht entscheidbar sein**

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

- Voraussetzungen präzisieren

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

- **Voraussetzungen präzisieren**
  - $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

- **Voraussetzungen präzisieren**

- $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$
- $L \in \mathcal{NP}$ , falls  $L$  von einer NTM in polynomieller Zeit entschieden wird

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

- **Voraussetzungen präzisieren**

- $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$
- $L \in \mathcal{NP}$ , falls  $L$  von einer NTM in polynomieller Zeit entschieden wird
- $L' \leq_p L$ , falls  $x \in L' \Leftrightarrow f(x) \in L$  für eine polynomiell bb. Funktion  $f$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

- **Voraussetzungen präzisieren**

- $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$
- $L \in \mathcal{NP}$ , falls  $L$  von einer NTM in polynomieller Zeit entschieden wird
- $L' \leq_p L$ , falls  $x \in L' \Leftrightarrow f(x) \in L$  für eine polynomiell bb. Funktion  $f$
- $\mathbf{VC} = \{ (G, k) \mid \exists V' \subseteq V. |V'| \leq k \wedge V' \text{ Knotenüberdeckung von } G \}$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

- **Voraussetzungen präzisieren**

- $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$
- $L \in \mathcal{NP}$ , falls  $L$  von einer NTM in polynomieller Zeit entschieden wird
- $L' \leq_p L$ , falls  $x \in L' \Leftrightarrow f(x) \in L$  für eine polynomiell bb. Funktion  $f$
- $\mathbf{VC} = \{ (G, k) \mid \exists V' \subseteq V. |V'| \leq k \wedge V' \text{ Knotenüberdeckung von } G \}$

- **Standard-Lösungsweg**

1. Zeige  $\mathbf{VC} \in \mathcal{NP}$ :

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

### ● Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$
- $L \in \mathcal{NP}$ , falls  $L$  von einer NTM in polynomieller Zeit entschieden wird
- $L' \leq_p L$ , falls  $x \in L' \Leftrightarrow f(x) \in L$  für eine polynomiell bb. Funktion  $f$
- $\mathbf{VC} = \{ (G, k) \mid \exists V' \subseteq V. |V'| \leq k \wedge V' \text{ Knotenüberdeckung von } G \}$

### ● Standard-Lösungsweg

1. Zeige  $\mathbf{VC} \in \mathcal{NP}$ :

- a) Beschreibe, welchen Lösungsvorschlag die NTM generiert
- b) Beschreibe, wie Lösungsvorschlag deterministisch überprüft wird
- c) Zeige, daß das Prüfverfahren polynomiell ist

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

### ● Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$
- $L \in \mathcal{NP}$ , falls  $L$  von einer NTM in polynomieller Zeit entschieden wird
- $L' \leq_p L$ , falls  $x \in L' \Leftrightarrow f(x) \in L$  für eine polynomiell bb. Funktion  $f$
- $\mathbf{VC} = \{ (G, k) \mid \exists V' \subseteq V. |V'| \leq k \wedge V' \text{ Knotenüberdeckung von } G \}$

### ● Standard-Lösungsweg

1. Zeige  $\mathbf{VC} \in \mathcal{NP}$ :

- a) Beschreibe, welchen Lösungsvorschlag die NTM generiert
- b) Beschreibe, wie Lösungsvorschlag deterministisch überprüft wird
- c) Zeige, daß das Prüfverfahren polynomiell ist

2. Zeige  $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p \mathbf{VC}$ :

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT

Zeige, daß das Vertex Cover Problem  $\mathcal{NP}$ -vollständig ist

### ● Voraussetzungen präzisieren

- $L$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig, falls  $L \in \mathcal{NP}$  und  $L' \leq_p L$  für jedes  $L' \in \mathcal{NP}$
- $L \in \mathcal{NP}$ , falls  $L$  von einer NTM in polynomieller Zeit entschieden wird
- $L' \leq_p L$ , falls  $x \in L' \Leftrightarrow f(x) \in L$  für eine polynomiell bb. Funktion  $f$
- $\mathbf{VC} = \{ (G, k) \mid \exists V' \subseteq V. |V'| \leq k \wedge V' \text{ Knotenüberdeckung von } G \}$

### ● Standard-Lösungsweg

1. Zeige  $\mathbf{VC} \in \mathcal{NP}$ :

- a) Beschreibe, welchen Lösungsvorschlag die NTM generiert
- b) Beschreibe, wie Lösungsvorschlag deterministisch überprüft wird
- c) Zeige, daß das Prüfverfahren polynomiell ist

2. Zeige  $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p \mathbf{VC}$ :

- d) Wähle ein ähnliches, bekanntes  $\mathcal{NP}$ -vollständiges Problem  $L'$
- e) Beschreibe Transformationsfunktion  $f$  von  $L'$  auf  $\mathbf{VC}$
- f) Zeige für alle  $x \in \Sigma'^*$ :  $x \in L' \Leftrightarrow f(x) \in \mathbf{VC}$
- g) Zeige, daß  $f$  in polynomieller Zeit berechnet werden kann

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

1. Zeige  $VC \in \mathcal{NP}$ :

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

1. Zeige  $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$

*maximal  $|V'|$  Schritte*

*maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E$$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$

*maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

$$\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

$$\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$$

$$\Leftrightarrow V - V_c \text{ Knotenüberdeckung von } G^c = (V, E^c)$$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$

*maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

$$\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$$

$$\Leftrightarrow V - V_c \text{ Knotenüberdeckung von } G^c = (V, E^c)$$

Setze  $f(G, k) := (G^c, |V| - k)$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

$$\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$$

$$\Leftrightarrow V - V_c \text{ Knotenüberdeckung von } G^c = (V, E^c)$$

Setze  $f(G, k) := (G^c, |V| - k)$

f) Es folgt  $(G, k) \in CLIQUE$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

- a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$
- b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*  
 Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*
- c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

- d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

- e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

$$\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$$

$$\Leftrightarrow V - V_c \text{ Knotenüberdeckung von } G^c = (V, E^c)$$

Setze  $f(G, k) := (G^c, |V| - k)$

- f) Es folgt  $(G, k) \in CLIQUE \Leftrightarrow G$  hat Clique  $V_c$  der Mindestgröße  $k$

# BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

## 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

## 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

$$\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$$

$$\Leftrightarrow V - V_c \text{ Knotenüberdeckung von } G^c = (V, E^c)$$

Setze  $f(G, k) := (G^c, |V| - k)$

f) Es folgt  $(G, k) \in CLIQUE \Leftrightarrow G$  hat Clique  $V_c$  der Mindestgröße  $k$

$\Leftrightarrow G^c$  hat Knotenüberdeckung  $V' = V - V_c$  der Maximalgröße  $|V| - k$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$

b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*

Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*

c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$

e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$

$$\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$$

$$\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$$

$$\Leftrightarrow V - V_c \text{ Knotenüberdeckung von } G^c = (V, E^c)$$

Setze  $f(G, k) := (G^c, |V| - k)$

f) Es folgt  $(G, k) \in CLIQUE \Leftrightarrow G$  hat Clique  $V_c$  der Mindestgröße  $k$

$$\Leftrightarrow G^c \text{ hat Knotenüberdeckung } V' = V - V_c \text{ der Maximalgröße } |V| - k$$

$$\Leftrightarrow f(G, k) = (G^c, |V| - k) \in VC$$

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

- a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$
- b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*  
 Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*
- c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

- d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$
- e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$   
 $\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$   
 $\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$   
 $\Leftrightarrow V - V_c$  Knotenüberdeckung von  $G^c = (V, E^c)$   
 Setze  $f(G, k) := (G^c, |V| - k)$
- f) Es folgt  $(G, k) \in CLIQUE \Leftrightarrow G$  hat Clique  $V_c$  der Mindestgröße  $k$   
 $\Leftrightarrow G^c$  hat Knotenüberdeckung  $V' = V - V_c$  der Maximalgröße  $|V| - k$   
 $\Leftrightarrow f(G, k) = (G^c, |V| - k) \in VC$
- g)  $f$  ist in polynomieller Zeit  $\mathcal{O}(|V|^2)$  berechenbar

## BEISPIEL III: $\mathcal{NP}$ -VOLLSTÄNDIGKEIT VON $VC$

### 1. Zeige $VC \in \mathcal{NP}$ :

- a) Rate eine Kantenmenge  $V' \subseteq V$
- b) Prüfe  $|V'| \leq k$  *maximal  $|V'|$  Schritte*  
 Prüfe:  $\forall \{v, v'\} \in E. v \in V' \vee v' \in V'$  *maximal  $|V'| * |E| \leq |V|^3$  Schritte*
- c) Gesamte Anzahl der Schritte ist in  $\mathcal{O}(|V|^3)$

### 2. Zeige $\exists L' \in \mathcal{NPC}. L' \leq_p VC$

- d) Wähle das  $\mathcal{NP}$ -vollständige Cliques Problem, zeige  $CLIQUE \leq_p VC$
- e) Es ist  $V'$  eine Clique in  $G = (V, E)$   
 $\Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. v \neq v' \Rightarrow \{v, v'\} \in E \quad \Leftrightarrow \forall v, v' \in V_c. \{v, v'\} \notin E^c$   
 $\Leftrightarrow \forall \{v, v'\} \in E^c. v \in V - V_c \vee v' \in V - V_c$   
 $\Leftrightarrow V - V_c$  Knotenüberdeckung von  $G^c = (V, E^c)$   
 Setze  $f(G, k) := (G^c, |V| - k)$
- f) Es folgt  $(G, k) \in CLIQUE \Leftrightarrow G$  hat Clique  $V_c$  der Mindestgröße  $k$   
 $\Leftrightarrow G^c$  hat Knotenüberdeckung  $V' = V - V_c$  der Maximalgröße  $|V| - k$   
 $\Leftrightarrow f(G, k) = (G^c, |V| - k) \in VC$
- g)  $f$  ist in polynomieller Zeit  $\mathcal{O}(|V|^2)$  berechenbar

Aus  $VC \in \mathcal{NP}$  und  $CLIQUE \leq_p VC$  folgt  **$VC$  ist  $\mathcal{NP}$ -vollständig**