Was bisher geschah

Daten, Information, Wissen, Lernen, Intelligenz

Ziel künstlicher Intelligenz: Unterstützen / Treffen von Entscheidungen

Verfahren:

- Kontext: Zustandsübergangssystem
- Lösung: Pfad im Zustandsübergangssystem, Strategie
- Lösungsverfahren: Pfadsuche (informiert, uninformiert)
  Spielstrategien, Minimax-Werte, α-β-Suche

(sichere) Klassifikation

- Kontext: Regelmenge, Fall (spezielle Merkmalswerte)
  Lösung: Modell(e)
  Lösungsverfahren: Bestimmung der Modellmenge, evtl. Auswahl
- Kontext: Entscheidungstabelle, Fall (spezielle Merkmalswerte)
  Lösung: Aktionsteil einer Spalte
  Lösungsverfahren: Finden der ersten Spalte (von links) mit zum Fall passendem Bedingungsteil
- Kontext: Entscheidungsbaum / (RO)BDD , Fall
  Lösung: Blatt im Baum / DAG
  Lösungsverfahren: Verfolgung des Pfades von der Wurzel aus anhand der fallspezifischen Merkmalswerte

Logiken

Klassische Logiken:

- Aussagenlogik:
  Repräsentation einfacher und zusammengesetzter Aussagen
- Prädikatenlogik:
  Wissen über Eigenschaften von und Beziehungen zwischen Objekten eines Bereiches

Prinzipien der klassischen Logik:

Zweiwertigkeit Jede Aussage ist wahr oder falsch.

ausgeschlossener Widerspruch Keine Aussage ist sowohl wahr als auch falsch.

Nichtklassische Logiken

- Nichtmonotone Logiken: unvollständiges Wissen
- mehrwertige Logiken:
  unsicheres und unscharfes Wissen
  fuzzy Logiken, probabilistische Logiken
- Modallogiken:
  Wissen über verschiedene mögliche Welten (Zustände)
  - Temporallogiken: Wissen über zeitliche Zusammenhänge (Zustandsübergangssysteme)
  - Beschreibungslogiken:
    Wissen über Begriffe und Zusammenhänge zwischen diesen
  - Epistemische Logiken:
    Wissen über Wissen (z.B. verschiedener Agenten)

Logiken

Ziele:

- Beantwortung von Anfragen der Form: Gilt $\Phi \models \psi$?
  (Für welche Individuen) Gilt die Aussage ... unter den bekannten Voraussetzungen?
- Herleitung neuen Wissens: Für welche ψ gilt $\Phi \models \psi$?
- Konsistenztests vorhandenen Wissens: Ist Φ erfüllbar?
- Konsistentes Zusammenfügen verschiedener Wissensquellen
  Ist $\Phi_1 \cup \Phi_2$ erfüllbar? falls nicht, maximale erfüllbare Teilmengen

Lösungsverfahren:

- Suche nach (intendierten) Modellen
- semantische Methoden:
  semantisches Folgern (z.B. für AL: Wahrheitswerttabellen, Entscheidungstabellen, Entscheidungsbäume, SAT-Solver)
- syntaktische Methoden:
  Schließen, Ableiten in logischen Kalkülen, Beweisen

Wiederholung Aussagenlogik: Semantik

Belegung $W : P \to \{0, 1\}$

Wert von $\varphi \in \mathrm{AL}(P)$ unter Belegung W:

- $W(\varphi) = W(p)$ für $\varphi = p \in P$,
- induktive Berechnung von $W(\varphi)$ für zusammengesetzte Formeln φ

Modell (erfüllende Belegung) für $\varphi \in \mathrm{AL}(P)$:
$W : P \to \{0, 1\}$ mit $W(\varphi) = 1$

Modellmenge von $\varphi \in \mathrm{AL}(P)$:
$\mathrm{Mod}(\varphi) = \{W : P \to \{0, 1\} \mid W(\varphi) = 1\}$
(Boolesche Funktion, Wahrheitswerttabelle)

Formel $\varphi \in \mathrm{AL}(P)$ heißt

erfüllbar gdw. $\mathrm{Mod}(\varphi) \neq \emptyset$

unerfüllbar gdw. $\mathrm{Mod}(\varphi) = \emptyset$

allgemeingültig gdw. $\mathrm{Mod}(\neg\varphi) = \emptyset$

Wiederholung Semantisches Folgern

$\psi \in \mathsf{AL}(P)$ heißt genau dann (semantische) Folgerung aus $\Phi \subseteq \mathsf{AL}(P)$, wenn jedes Modell für Φ auch ein Modell für ψ ist.

Kurzform:

$$\Phi \models \psi \quad \text{gdw.} \quad \mathsf{Mod}(\Phi) \subseteq \mathsf{Mod}(\psi)$$

Beispiele:

- $\{p, p \to q\} \models q$
- $\{p, \neg(q \wedge p)\} \models \neg q$
- $\{p\} \models q \to p$
- $\{q \to p\} \not\models p$
- $\emptyset \models p \vee \neg p$
- $p \wedge \neg p \models q$

Wiederholung Folgerungsrelation

Folgerungsrelation:
zweistellige Relation $\models \subseteq 2^{\mathsf{AL}(P)} \times \mathsf{AL}(P)$

Spezialfälle der Notation:

für $\Phi = \{\varphi\}$: $\varphi \models \psi$ (statt $\{\varphi\} \models \psi$)
für $\Phi = \emptyset$: $\models \psi$ (statt $\emptyset \models \psi$)

Fakt

Für jede Formel $\varphi \in \mathsf{AL}(P)$ gilt $\models \varphi$ genau dann, wenn φ allgemeingültig ist.

Wiederholung: Sätze über das Folgern

- Für endliche Formelmengen $\Phi = \{\varphi_1, \ldots, \varphi_n\}$ gilt

$$\Phi \models \psi \quad \text{genau dann, wenn} \quad \bigwedge_{i=1}^{n} \varphi_i \models \psi$$

- $\varphi \equiv \psi$ gdw. $\varphi \models \psi$ und $\psi \models \varphi$

Für jede Formelmenge $\Phi \subseteq \mathsf{AL}(P)$ und jede Formel $\psi \in \mathsf{AL}(P)$ gilt:

- falls $\psi \in \Phi$ gilt $\Phi \models \psi$.
- $\Phi \models \psi$ gdw. $\mathsf{Mod}(\Phi) = \mathsf{Mod}(\Phi \cup \{\psi\})$
- $\Phi \models \psi$ gdw. $\Phi \cup \{\neg\psi\}$ unerfüllbar
- $\Phi \models \psi$ gdw. $\Phi \cup \{\neg\psi\} \models \mathbb{f}$

Wiederholung Beispiel

Kontext (Wissensbasis): Wenn der Zug zu spät kommt und kein Taxi am Bahnhof steht, ist Tom nicht pünktlich.
Der Zug kam zu spät und Tom ist pünktlich.
Modellierung:
z – Zugverspätung, t – Taxi da, p – pünktlich
$\Phi = \{\underbrace{z \wedge \neg t \rightarrow \neg p}_{\text{Regel}}, \underbrace{z \wedge p}_{\text{Fakt(en)}}\}$

Frage Stand ein Taxi am Bahnhof?
Behauptung $\psi = t$
Gilt $\Phi \models \psi$?

Lösung
- semantisch, z.B. Modellmengen (WW-Tabellen)
- syntaktisch, z.B. aussagenlogische Resolution
- maschinell (Kombination), z.B. SAT-Solver

Regelbasierte Systeme

Wissensrepräsentation durch
Mengen von Regeln (ohne Alternative)

Regel: Falls φ, dann ψ
φ Rumpf (Voraussetzung), ψ Kopf (Folgerung)

als logische Formel $\varphi \rightarrow \psi$

aussagenlogische Regeln mit $\varphi, \psi \in \mathsf{AL}(P)$

prädikatenlogische Regeln mit $\varphi, \psi \in \mathsf{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$

mögliche Bedeutungen der Regel: Falls φ, dann ψ

Implikationsregel: Interpretation des Regelkopfes als Aussage
(φ, ψ Formeln)

Aktionsregel: Interpretation des Regelkopfes als Aktion
(φ Formel, ψ als Aktion)

Wissensrepräsentation durch Regeln

Regel (ohne Alternative): Implikation $r = (\varphi \to \psi)$

Kopf $H(r) = \psi$ (Folgerung)

Rumpf $B(r) = \varphi$ (Voraussetzung)

Aufbau und häufige Formen von Regeln:

Literal : einfaches oder negiertes (aussagen- oder prädikatenlogisches) Atom

Klausel : Disjunktion $l_1 \vee \cdots \vee l_n$ von Literalen $l_1, \ldots, l_n$

Regel : Implikation $r = (\varphi \to \psi)$ der Form

$$\begin{aligned} r &= ((b_1 \wedge \ldots \wedge b_n \wedge \neg c_1 \wedge \ldots \wedge \neg c_m) \to h) \\ &\equiv (\neg b_1 \vee \cdots \vee \neg b_n \vee c_1 \vee \cdots \vee c_m \vee h) \end{aligned}$$

mit Atomen $b_1, \ldots, b_n$ (positive Voraussetzungen) und $c_1, \ldots, c_m$ (negative Voraussetzungen) und h (Kopf)

definite Regel (ohne negative Voraussetzungen): Implikation $r = (\varphi \to \psi)$ mit

$$r = ((b_1 \wedge \ldots \wedge b_n) \to h) \equiv (\neg b_1 \vee \cdots \vee \neg b_n \vee h)$$

Hornklausel: enthält genau ein positives Literal

Interpretation von Regeln

Regel

$$r = ((b_1 \wedge \ldots \wedge b_n \wedge \neg c_1 \wedge \ldots \wedge \neg c_m) \rightarrow h)$$

mögliche Interpretation des Regelkopfes ψ als

Aussage , z.B. Kälte $\wedge$ Niederschlag $\rightarrow$ Schnee
Deduktionsregeln

Aktion , z.B. heiße Stirn $\rightarrow$ Fieber messen
Aktionsregeln, Produktionsregeln

Regelwissen

Regelbasiertes System (Produktionssystem) besteht aus

- Wissensbasis (F, R) mit
  - Regelmenge (meist Kontext)
    $R = \{(\varphi_i \to \psi_i) \mid i \in \{1, \ldots, n\}\}$ und
  - Faktenmenge (meist Fall)
    $F = \{f_1, \ldots, f_m\}$

  (meist alle φ_i Konjunktionen von Literalen und f_i, ψ_i Atome)
- evtl. Anfrage ψ
- Regelinterpreter (Inferenzverfahren):
  definiert das Ableiten neuer Fakten durch Anwendung der Regeln

Regelbasiertes Problemlösen

gegeben:

- Wissensbasis $P = F \cup R$ (z.B. logisches Programm)
  Jede Regel mit Variablen repräsentiert die Mengen aller Instanzen.
- Anfrage (Hypothese) h
  evtl. mit Variablen

gesucht:

- Nachweis, dass die Hypothese h aus der Wissensbasis folgt
  Lösung: erfüllende Belegung der Variablen
  (falls in Anfrage enthalten)

übliche Verfahren:

Rückwärtsverkettung: Suche nach Antworten auf eine gezielte Anfrage (zielorientiert), z.B. Prolog

Vorwärtsverkettung: Ableitung neuen Wissens als Folgerungen aus Faktenmengen (datenorientiert), z.B. Datalog

Prinzip Rückwärtsverkettung

gegeben:

- Wissensbasis $P = F \cup R$ mit
  - endliche Regelmenge R (Klauseln)
  - endliche Faktenmenge F (Literale)
- Anfrage (Hypothese) h (Literal)

rekursive Definition:
Hypothese h ist aus der Wissensbasis (R, F) ableitbar, falls

IA: $h \in F$ (evtl. Nutzer fragen) oder

IS: es existiert eine Regel $(l_1 \wedge \cdots \wedge l_n \rightarrow h) \in R$ und alle $l_1, \ldots, l_n$ aus (R, F) ableitbar.
(Rekursion: alle $l_1, \ldots, l_n$ werden neue Hypothesen)

Beispiel Rückwärtsverkettung

Beispiel:

Kontext (Wissensbasis, Regelmenge) $R = \{R1, R2, R3\}$ mit

R1 Schollen sind Fische. $s \rightarrow f$

R2 Zu Steaks serviert Tom Bier. $m \rightarrow b$

R3 Zu Fisch serviert Tom Wein. $f \rightarrow w$

Fall (Faktenmenge) $F = \{F1\}$:

F1 Tom kocht heute Scholle. s

Frage: Serviert Tom heute Wein? (Hypothese, zielorientiert) w
wird positiv beantwortet.

Schlussschritte für w aus R und F:

1. R3 erzeugt aus Hypothese w neue Hypothese f
2. R1 erzeugt aus Hypothese f neue Hypothese s
3. s ist ein Fakt in F

Verfahren: schrittweise Generierung neuer Hypothesen
(welche die Wahrheit der Anfrage belegen könnten)

Rückwärtsverkettung

Anwendung der Regeln (Regelinstanzen)
von rechts (Kopf) nach links (Rumpf)

+ zielgerichtete Suche,
  keine Abfrage unnötiger Fakten
- Hypothese (Anfrage) benötigt

Idee der Programmiersprache Prolog (später mehr dazu)

Prinzip Vorwärtsverkettung

gegeben:

- Wissensbasis (R, F) mit
  - Kontext: endliche Regelmenge R
  - Fall: endliche Faktenmenge F

Anwendbarkeit von Regeln:
Regel(instanz) feuert (ist anwendbar) in einer Faktenmenge gdw. Voraussetzung (Regelrumpf) in dieser Faktenmenge erfüllt.
Verfahren: Schrittweise Erweiterung der Faktenmenge um gültige Fakten (Köpfe feuernder Regeln)
rekursive Definition:
Menge aller Folgerungen (Grundatome) aus Wissensbasis (R, F):
(bzgl. $\subseteq$) kleinste Menge $T(R, F)$ mit

IA: $F \subseteq T(R, F)$

IS: Falls $p_1, \ldots, p_n \in T(R, F)$
und $(p_1 \wedge \cdots \wedge p_n \rightarrow h) \in R$
dann ist auch $h \in T(R, F)$
(Rekursion: alle h werden neue Fakten)

Beispiel Vorwärtsverkettung

Beispiel: aus der Wissensbasis

R1	Babies sind Kinder.	$\forall x : b(x) \rightarrow k(x)$
R2	Männliche Kinder sind Jungen.	$\forall x : (m(x) \wedge k(x)) \rightarrow j(x)$
R3	Weibliche Kinder sind Mädchen.	$\forall x : (w(x) \wedge k(x)) \rightarrow g(x)$
F1	Tom ist ein Baby.	$b(T)$
F2	Tom ist männlich.	$m(T)$

folgt (ohne gezielte Anfrage): Tom ist ein Kind. Tom ist ein Junge.
Instanz $b(T) \rightarrow k(T)$ der Regel R1 feuert in der Faktenmenge
$F = \{b(T), m(T)\}$,
weil $b(T) \in F$, also Voraussetzung (Regelrumpf) in F erfüllt.
schrittweise Erweiterung der Faktenmenge um gültige Fakten:

$$
\begin{aligned}
F_0 &= \{b(T), m(T)\} \\
F_1 &= \{b(T), m(T), k(T)\} \quad \text{wegen R1} \\
F_2 &= \{b(T), m(T), k(T), j(T)\} \quad \text{wegen R2} \\
F_3 &= F_2 \qquad \text{(Fixpunkt)}
\end{aligned}
$$

Typische regelbasierte Systeme

Regelbasiertes System (Produktionssystem): (endliche) Mengen

- R der Regeln, oft einer bestimmten Form (z.B. definit)
- F der Fakten

häufige Formen der Bedingungen:

- $a = b$, $a \neq b$ (Gleichheit von Objekten)
- $p(a), r(a, b, c)$ (Eigenschaft / Zusammenhang von Objekten)
- $w(a) = v$ (Attributwerte von Objekten)

übliche Aktionen:

- direkte Änderung der Wissensbasis
  (z.B. Erweiterung, Korrektur)
- Rückfragen (Antwort führt zur Änderung der Wissensbasis)
- Handlungsanweisungen (z.B. Reglereinstellung)
  führt zu Zustandsänderungen (Änderung der Wissensbasis)

Wissensverarbeitung häufig durch
Vorwärtsverkettung (Produktion) mit Konfliktlösestrategien

Konflike bei Aktionsregeln

gegeben: Faktenmenge F, Regelmenge R (z.B. definit)

Regel $b_1 \wedge \cdots \wedge b_n \rightarrow h$ feuert in F genau dann , wenn ihr Rumpf $b_1 \wedge \cdots \wedge b_n$ in F erfüllt ist (also wenn $\{b_1, \ldots, b_i\} \in F$)

Problem:

- Faktenmenge (Zustand) F' mit mehreren anwendbaren Regeln aus R, die gegenteilige Aktionen auslösen
- Aktionsteil welcher Regel soll ausgeführt werden?

Konfliktmenge zu einer Faktenmenge F':
Menge aller in F' anwendbaren Regeln aus R

Beispiele

Regeln: R1 Wenn Besuch zum Essen kommt,
gibt es entweder Weiß- oder Rotwein.
R2 Zum Fisch gibt es Weißwein.
R3 Wenn Bob da ist, gibt es Rotwein.

Fakten: F Bob kommt zum Fischessen.

Frage: Welches Getränk wird serviert?

Konfliktmenge in $\{F\}$: $\{R1, R2, R3\}$

Regeln: R1 Vögel können fliegen.
R2 Pinguine sind Vögel.
R3 Pinguine können nicht fliegen.

Fakten: F Tweety ist ein Pinguin.

Frage: Kann Tweety fliegen?

nach einer Anwendung von R2: Faktenmenge $\{p(t), v(t)\}$
Konfliktmenge in $\{p(t), v(t)\}$: $\{R1, R3\}$

Konfliktlösestrategien

Konfliktlösung in Faktenmenge F durch Auswahl einer Teilmenge der Konfliktmenge , deren Anwendung nicht widersprüchlich ist.

oft durch (schrittweises) Entfernen Ignorieren ausgewählter Regeln

(einige) Konfliktlösestrategien:

Refraktionsprinzip: Keine Regelinstanz feuert zweimal direkt nacheinander

Präferenzen: Bei der Wissensrepräsentation mit definierte Ordnung auf Regeln
Regeln niederer Präferenzen feuern nicht, wenn eine Konflikt-Regel höherer Präferenz angewendet wurde.

Spezifität: spezifischere Regelinstanzen werden bevorzugt

Aktualität: erstmals feuernde Regeln werden bevorzugt

zufällige Auswahl einer Regel

also auch hier: Lösung anhand
Bewertung / Klassifikation der Optionen / Aktionen

Wiederholung Prädikatenlogik: Syntax

Ziel: Modellierung von Aussagen über Eigenschaften und Beziehungen von Objekten eines bestimmten Bereiches

Signatur $\Sigma = (\Sigma_F, \Sigma_R)$ Funktions- und Relationssymbole

(Individuen-)Variablen $\mathbb{X}$

Terme $\mathrm{Term}(\Sigma_F, \mathbb{X})$, induktive Definition:

- **IA:** $\mathbb{X} \subseteq \mathrm{Term}(\Sigma_F, \mathbb{X})$
- **IS:** Aus $(f, n) \in \Sigma_F$ und $t_1, \ldots, t_n \in \mathrm{Term}(\Sigma_F, \mathbb{X})$ folgt $f(t_1, \ldots, t_n) \in \mathrm{Term}(\Sigma_F, \mathbb{X})$.

Atome $\mathrm{Atom}(\Sigma, \mathbb{X})$:

Aus $(p, n) \in \Sigma_R$ und $t_1, \ldots, t_n \in \mathrm{Term}(\Sigma_F, \mathbb{X})$ folgt $p(t_1, \ldots, t_n) \in \mathrm{Atom}(\Sigma_F, \mathbb{X})$

Formeln $\mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$ induktive Definition:

- **IA:** $\mathrm{Atom}(\Sigma, \mathbb{X}) \subseteq \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$
- **IS:** Falls j ein n-stelliger Junktor ist, $x \in \mathbb{X}$ und $\varphi_1, \ldots, \varphi_n \in \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$, dann gilt $j(\varphi_1, \ldots, \varphi_n) \in \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$, $\forall x \varphi \in \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$ und $\exists x \varphi \in \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$,

Wiederholung Prädikatenlogik: Semantik

Σ-Struktur $\mathcal{A} = (A, [\![\cdot]\!]_{\mathcal{A}})$ mit

- nichtleerer Menge A (Trägermenge)
- Interpretation $[\![\cdot]\!]_{\mathcal{A}}$ der Funktions- und Relationssysmbole aus Σ
  - für jedes $(f, n) \in \Sigma_F$ eine Funktion $[\![f]\!]_{\mathcal{A}} : A^n \to A$
  - für jedes $(p, n) \in \Sigma_R$ eine Relation $[\![p]\!]_{\mathcal{A}} \subseteq A^n$

Belegung $\beta : X \to A$ der Individuenvariablen

Eine Interpretation $(\mathcal{A}, \beta)$ für Term $t \in \mathrm{Term}(\Sigma_F, X)$ oder Formel $\varphi \in \mathrm{FOL}(\Sigma, X)$

- einer Σ-Struktur $\mathcal{A} = (A, [\![\cdot]\!]_{\mathcal{A}})$ und
- einer Variablenbelegung $\beta : X \to A$.

Menge aller Modelle der Formel $\varphi \in \mathrm{FOL}(\Sigma, X)$

$$\mathrm{Mod}(\varphi) = \left\{ (\mathcal{S}, \beta) \;\middle|\; \begin{array}{c} (\mathcal{S}, \beta) \text{ ist } \Sigma\text{-Interpretation und} \\ [\![\varphi]\!]_{(\mathcal{S},\beta)} = 1 \end{array} \right\}$$

(Eingeschränkte) Übersetzung in Aussagenlogik

Grundinstanziierung $G : \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X}) \to 2^{\mathrm{AL}(P)}$ in einer Σ-Struktur $\mathcal{A} = (A, [\![\cdot]\!]_{\mathcal{A}})$ (nur die endliche Trägermenge A relevant):
Grundinstanziierung der Formel $\varphi \in \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X})$:

1. Signaturerweiterung $\Sigma' = \Sigma \cup \{(d, 0) \mid d \in A\}$:
   neues Konstantensymbol $(d, 0) \in \Sigma_F$ für jedes $d \in A$
2. Ersetzung aller Quantoren und gebundenen Variablen:
   $\forall x \varphi \mapsto \bigwedge_{d \in A} \varphi\{x \mapsto d\}$, $\exists x \varphi \mapsto \bigvee_{d \in A} \varphi\{x \mapsto d\}$,
3. Ersetzung $\beta : \mathrm{FOL}(\Sigma, \mathbb{X}) \to 2^{\mathrm{FOL}(\Sigma', \emptyset)}$ aller freien Variablen:
   Formelmenge $\beta(\varphi) =$
   $\{\varphi\{x_1 \mapsto a_1, \ldots, x_n \mapsto a_n\} \mid \mathrm{fvar}(\varphi) = \{x_1, \ldots, x_n\}, a_1, \ldots, a_n \in A\}$
4. Ersetzung (Umbenennung) jedes Grundatoms $a \in \mathrm{Atom}(\beta(\varphi))$
   durch eine Aussagenvariable $p \in P$
   (z.B. $p(a_1, \ldots, a_n) \mapsto p a_1 \cdots a_n$)

Beispiele (Tafel): Grundinstanzen von

- $p(x, x) \wedge \exists x\ p(y, x)$ in $A = \{1, 2\}$,
- $\forall x (P(x) \to \exists y N(y, x))$ in $A' = \{$ Anton, Berta, Conny $\}$

Grundinstanziierung zur Wissensverarbeitung

1. Formulierung der Wissensbasis als Formelmenge
2. Formulierung der Frage als Formel
   (Behauptung, evtl. mit Variablen)
3. Grundinstanziierung (sofern möglich)
4. Transformation in z.B. Klauselmenge
   (Konjunktion von Regeln, CNF)
5. Lösung durch aussagenlogisches Verfahren

Vorteile:
- Entscheidbarkeit,
- aussagenlogische Methoden anwendbar,
- Standard-Werkzeuge einsetzbar,
  z.B. SAT-Solver

Nachteile:
- ergibt evtl. große unübersichtliche Formelmengen,
- nur möglich, falls beide folgende Bedingungen erfüllt sind:
  1. Struktur hat endliche Trägermenge
  2. Signatur enthält keine > 0-stelligen Funktionen
     (nur Konstanten)

Altenative (später): benötigte Instanzen nach Bedarf erzeugen