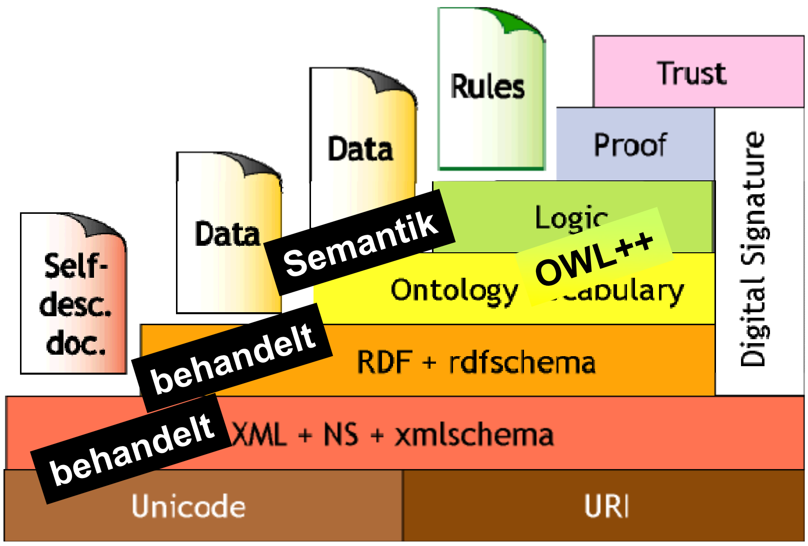
Intelligente Systeme im World Wide Web

Web Ontology Language OWL: Semantik

Folien zur Vorlesung im Sommersemester 2007
PD Dr. Pascal Hitzler
Dr. Sebastian Rudolph, Dr. Raphael Volz
Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB)
Universität Karlsruhe (TH)

Die Semantic Web Schichttorte



AIFB

Inhalt der nächsten 3 Sitzungen

I. OWL – Syntax und allgemeines Verständnis
II. Logik (Wiederholung)
III. OWL – Semantische Grundlagen
  a. Beschreibungslogiken
  b. Beweistheorie
IV. Ontologiesprache F-Logik

AIFB

FOL als Ontologiesprache

- Warum nicht einfach FOL für Ontologien nehmen?
- FOL kann alles

  Assembler auch!
- FOL ist
  - sehr ausdrucksstark
  - deshalb unhandlich bei der Modellierung
  - schlecht geeignet um Konsens bei der Modellierung zu finden
  - Beweistheoretisch sehr komplex

$\Rightarrow$ Suche geeignetes Fragment von FOL

AIFB

Inhalt

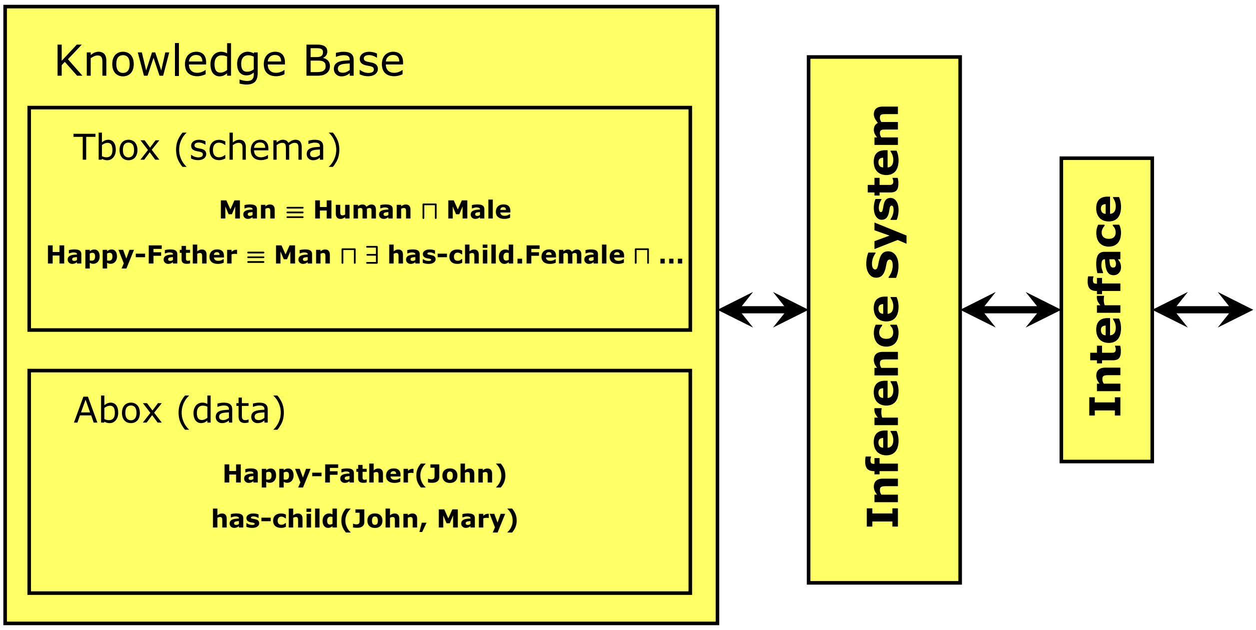
AIFB

Beschreibungslogiken (Description Logics, DLs)

- Fragmente von FOL
- meist entscheidbar
- ausdrucksstark
- entwickelt aus semantischen Netzwerken
- enge Beziehungen zu Modallogiken

- W3C Standard OWL DL ist die Beschreibungslogik SHOIN(D)
- Wir besprechen zunächst die einfachere ALC

Allgemeine DL Architektur



DLs – allgemeiner Aufbau

- DLs sind eine Familie logikbasierter Formalismen zur Wissensrepräsentation
- Spezielle Sprachen v.a. charakterisiert durch:
  - Konstruktoren für komplexe Konzepte und Rollen aus einfacheren.
  - Menge von Axiomen um Fakten über Konzepte, Rollen und Individuen auszudrücken.

- ALC ist die kleinste DL, die aussagenlogisch abgeschlossen ist
  - Konjunktion, Disjunktion, Negation sind Konstruktoren, geschrieben $\sqcap$, $\sqcup$, $\neg$.
  - Quantoren schränken Rollenbereiche ein:

Man $\sqcap$ $\exists$hasChild.Female $\sqcap$ $\exists$hasChild.Male $\sqcap$ $\forall$hasChild.(Rich $\sqcup$ Happy)

Weitere DL Konzept- und Rollenkonstruktoren

- Andere Konstruktoren sind z.B.
  - Number restrictions (cardinality constraints) für Rollen: ≥ 3 hasChild, ≤ 1hasMother
  - Qualified number restrictions: ≥ 2 hasChild.Female, ≤ 1 hasParent.Male
  - Nominals (definition by extension): {Italy, France, Spain}
  - Concrete domains (datatypes): hasAge.(≥ 21)
  - Inverse roles: hasChild^{-} $\equiv$ hasParent
  - Transitive roles: hasAncestor $\sqsubseteq^{+}$ hasAncestor
  - Role composition: hasParent.hasBrother(uncle)

ALC: Grundbausteine

- Grundbausteine:
  - Klassen
  - Rollen
  - Individuen
- Professor(RudiStuder)
  - Individuum RudiStuder ist in Klasse Professor
- Zugehoerigkeit(RudiStuder,AIFB)
  - RudiStuder ist dem AIFB zugehörig

ALC: Subklassenbeziehungen

- Professor $\sqsubseteq$ Fakultaetsmitglied
  - entspricht $(\forall x)(\text{Professor}(x) \rightarrow \text{Fakultaetsmitglied}(x))$
  - entspricht owl:subClassOf

- Professor $\equiv$ Fakultaetsmitglied
  - entspricht $(\forall x)(\text{Professor}(x) \leftrightarrow \text{Fakultaetsmitglied}(x))$
  - entspricht owl:equivalentClass

ALC: komplexe Klassenbeziehungen

- Konjunktion $\sqcap$ entspricht owl:intersectionOf
- Disjunktion $\sqcup$ entspricht owl:unionOf
- Negation $\neg$ entspricht owl:complementOf

- Professor $\sqsubseteq$ (Person $\sqcap$ Unversitaetsangehoeriger) $\sqcup$ (Person $\sqcap$ $\neg$Doktorand)

$$(\forall x)(\text{Professor}(x) \rightarrow ((\text{Person}(x) \land \text{Universitaetsangehoeriger}(x)) \lor (\text{Person}(x) \land \neg\text{Doktorand}(x)))$$

AIFB

ALC: Quantoren

- Pruefung $\sqsubseteq$ $\forall$hatPruefer.Professor
  $(\forall x)(\text{Pruefung}(x) \rightarrow (\forall y)(\text{hatPruefer}(x,y) \rightarrow \text{Professor}(y)))$
  - entspricht owl:allValuesFrom
- Pruefung $\sqsubseteq$ $\exists$hatPruefer.Person
  $(\forall x)(\text{Pruefung}(x) \rightarrow (\exists y)(\text{hatPruefer}(x,y) \land \text{Person}(y)))$
  - entspricht owl:someValuesFrom

AIFB

Modellierung in ALC

- owl:nothing: $\bot \equiv C \sqcap \neg C$
- owl:thing: $\top \equiv C \sqcup \neg C$
- owl:disjointWith: $C \sqcap D \equiv \bot$
  oder gleichbedeutend: $C \sqsubseteq \neg D$
- rdfs:range: $\top \sqsubseteq \forall R.C$
- rdfs:domain: $\exists R.\top \sqsubseteq C$

AIFB

ALC: Syntax

- Folgende Syntaxregeln erzeugen Klassen in ALC. Dabei ist A eine atomare Klasse und R eine Rolle.

  $C,D \rightarrow A \mid \top \mid \bot \mid \neg C \mid C \sqcap D \mid C \sqcup D \mid \forall R.C \mid \exists R.C$
- Eine *ALC TBox* besteht aus Aussagen der Form $C \sqsubseteq D$ und $C \equiv D$, wobei C, D Klassen sind.
- Eine *ALC ABox* besteht aus Aussagen der Form C(a) und R(a,b), wobei C eine komplexe Klasse, R eine Rolle und a,b Individuen sind.
- Eine *ALC-Wissensbasis* besteht aus einer ABox und einer TBox.

AIFB

ALC: Semantik

Übersetzung von TBox-Aussagen in die Prädikatenlogik mittels der Abbildung π (rechts).

Dabei sind C,D komplexe Klassen, R eine Rolle und A eine atomare Klasse.

$$
\begin{aligned}
\pi(C \sqsubseteq D) &= (\forall x)(\pi_x(C) \rightarrow \pi_x(D)) \\
\pi(C \equiv D) &= (\forall x)(\pi_x(C) \leftrightarrow \pi_x(D)) \\
\pi_x(A) &= A(x) \\
\pi_x(\neg C) &= \neg \pi_x(C) \\
\pi_x(C \sqcap D) &= \pi_x(C) \wedge \pi_x(D) \\
\pi_x(C \sqcup D) &= \pi_x(C) \vee \pi_x(D) \\
\pi_x(\forall R.C) &= (\forall y)(R(x,y) \rightarrow \pi_y(C)) \\
\pi_x(\exists R.C) &= (\exists y)(R(x,y) \wedge \pi_y(C)) \\
\pi_y(A) &= \boldsymbol{A(y)} \\
\pi_y(\neg C) &= \neg \pi_y(C) \\
\pi_y(C \sqcap D) &= \pi_y(C) \wedge \pi_y(D) \\
\pi_y(C \sqcup D) &= \pi_y(C) \vee \pi_y(D) \\
\pi_y(\forall R.C) &= (\forall x)(R(y,x) \rightarrow \pi_x(C)) \\
\pi_y(\exists R.C) &= (\exists x)(R(y,x) \wedge \pi_x(C))
\end{aligned}
$$

AIFB

DL Wissensbasen

- DL Wissensbasen bestehen aus 2 Teilen:
  - TBox: Axiome, die die Struktur der zu modellierenden Domäne beschreiben (konzeptionelles Schema):
    - **HappyFather $\equiv$ Man $\sqcap$ $\exists$hasChild.Female $\sqcap$ …**
    - **Elephant $\sqsubseteq$ Animal $\sqcap$ Large $\sqcap$ Grey**
    - **transitive(hasAncestor)**
  - Abox: Axiome, die konkrete Situationen (Daten) beschreiben:
    - **HappyFather(John)**
    - **hasChild(John, Mary)**
- Unterscheidung TBox/ABox hat keine logische Bedeutung … ist aber konzeptionell einfacher.

AIFB

Einfaches Beispiel

Terminologisches Wissen (*TBox*):

Human $\sqsubseteq$ $\exists$hasParent.Human

Orphan $\equiv$ Human $\sqcap$ $\neg\exists$hasParent.Alive

Wissen um Individuen (*ABox*):

Orphan(harrypotter)

hasParent(harrypotter,jamespotter)

Semantik und logische Konsequenzen klar, da übersetzbar nach FOL.

AIFB

Inhalt

OWL – Semantische Grundlagen

1. Modelltheoretische Semantik
   a. Beschreibungslogiken: ALC
   b. **OWL als SHOIN(D)**
   c. Serialisierungen
   d. Wissensmodellierung in OWL
2. Beweistheoretische Semantik
   a. Rückführung von Reasoning auf Unerfüllbarkeit
   b. Klassische Beweiser: Tableaux
   c. State-of-the-Art Beweiser via Resolution

AIFB

OWL und ALC

Folgende OWL DL Sprachelemente sind in ALC repräsentierbar:

- Klassen, Rollen, Individuen
- Klassenzugehörigkeit, Rolleninstanzen
- owl:Thing und owl:Nothing
- Klasseninklusion, -äquivalenz, -disjunktheit
- owl:intersectionOf, owl:unionOf
- owl:complementOf
- Rollenrestriktionen
- rdfs:range und rdfs:domain

OWL als SHOIN(D): Individuen

- owl:sameAs
  - DL: $a=b$
  - FOL: Erweiterung durch Gleichheitsprädikat

- owl:differentFrom
  - DL: $a \neq b$
  - FOL: $\neg(a=b)$

OWL als SHOIN(D): abgeschlossene Klassen

Abgeschlossene Klassen

- owl:oneOf
  - DL: $C \equiv \{a,b,c\}$
  - FOL: $(\forall x)\ (C(x) \leftrightarrow (x=a \vee x=b \vee x=c))$
- owl:hasValue
  - Darstellbar mittels owl:someValuesFrom und owl:oneOf

AIFB

OWL als SHOIN(D): Zahlenrestriktionen

Zahlenrestriktionen mittels Gleichheitsprädikat

```
<owl:Class rdf:about="#Pruefung">
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="#hatPruefer"/>
      <owl:maxCardinality rdf:datatype="&xsd;nonNegativeInteger">2</owl:maxcardinality>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>
```

Eine Prüfung kann *höchstens zwei* Prüfer haben.

- DL: Pruefung $\sqsubseteq \leq 2$ hatPruefer
- In FOL: (P… Prüfung, h…hatPruefer)
  $(\forall x)(P(x) \to \neg(\exists x1)(\exists x2)(\exists x3)(x1 \neq x2 \wedge x2 \neq x3 \wedge x1 \neq x3 \wedge h(x,x1) \wedge h(x,x2) \wedge h(x,x3)))$

Entsprechend für die anderen Zahlenrestriktionen

AIFB

OWL als SHOIN(D): Rollenkonstruktoren

- Rdfs:subPropertyOf
  - DL: $R \sqsubseteq S$
  - FOL: $(\forall x)(\forall y)(R(x,y) \to S(x,y))$
- Entsprechend Rollenäquivalenz
- Inverse Rollen: $R \equiv S^-$
  - FOL: $(\forall x)(\forall y)(R(x,y) \leftrightarrow S(y,x))$
- Transitive Rollen: $R^+ \sqsubseteq R$
  - FOL: $(\forall x)(\forall y)(\forall z)(R(x,y) \wedge R(y,z) \to R(x,z))$
- Symmetrie: $R \equiv R^-$
- Funktionalität: $\top \sqsubseteq \leq 1\ R$
- Inverse Funktionalität: $\top \sqsubseteq \leq 1\ R^-$

AIFB

Datentypen

- Erlaubt ist die Verwendung von Datentypen im zweiten Argument konkreter Rollen in der ABox.
- Ausserdem kann eine Menge konkreter Daten eine abgeschlossene Klasse bilden

- Datentypen lassen sich nicht ohne Weiteres in FOL ausdrücken. Man kann die FOL Semantik aber entsprechend erweitern.

AIFB

OWL DL als SHOIN(D): Überblick

Erlaubt sind:

- ALC
- Gleichheit und Ungleichheit zwischen Individuen
- Abgeschlossene Klassen
- Zahlenrestriktionen
- Subrollen und Rollenäquivalenz
- Inverse und transitive Rollen
- Datentypen

AIFB

Bezeichner für Beschreibungslogiken

- ALC: Attribute Language with Complement
- S: ALC + Rollentransitivität
- H: Subrollenbeziehung
- O: abgeschlossene Klassen
- I: inverse Rollen
- N: Zahlenrestriktionen ≤n R etc.
  - Q: Qualifizierende Zahlenrestriktionen ≤n R.C etc.
- (D): Datentypen
- F: Funktionale Rollen

- OWL DL ist SHOIN(D)
- OWL Lite ist SHIF(D)

Übersicht Syntax für DLs (ohne Datentypen)

AIFB

	Concepts	
ALC	Atomic	A, B
ALC	Not	¬C
ALC	And	C ⊓ D
ALC	Or	C ⊔ D
ALC	Exists	∃R.C
ALC	For all	∀R.C
Q (N)	At least	≥n R.C (≥n R)
Q (N)	At most	≤n R.C (≤n R)
O	Nominal	$\{i_1,\dots,i_n\}$

	Roles	
I	Atomic	R
I	Inverse	R⁻

Ontology (=Knowledge Base)

Concept Axioms (TBox)	
Subclass	C ⊑ D
Equivalent	C ≡ D

	Role Axioms (RBox)	
H	Subrole	R ⊑ S
S	Transitivity	Trans(S)

Assertional Axioms (ABox)	
Instance	C(a)
Role	R(a,b)
Same	a = b
Different	a ≠ b

S = ALC + Transitivity

OWL DL = SHOIN(D) (D: concrete domain)

AIFB

OWL DL als DL: Übersicht Klassenkonstruktoren

Constructor	DL Syntax	Example	FOL Syntax
intersectionOf	$C_1 \sqcap \ldots \sqcap C_n$	Human ⊓ Male	$C_1(x) \wedge \ldots \wedge C_n(x)$
unionOf	$C_1 \sqcup \ldots \sqcup C_n$	Doctor ⊔ Lawyer	$C_1(x) \vee \ldots \vee C_n(x)$
complementOf	$\neg C$	¬Male	$\neg C(x)$
oneOf	$\{x_1\} \sqcup \ldots \sqcup \{x_n\}$	{john} ⊔ {mary}	$x = x_1 \vee \ldots \vee x = x_n$
allValuesFrom	$\forall P.C$	∀hasChild.Doctor	$\forall y.P(x,y) \rightarrow C(y)$
someValuesFrom	$\exists P.C$	∃hasChild.Lawyer	$\exists y.P(x,y) \wedge C(y)$
maxCardinality	$\leqslant nP$	⩽1hasChild	$\exists^{\leqslant n} y.P(x,y)$
minCardinality	$\geqslant nP$	⩾2hasChild	$\exists^{\geqslant n} y.P(x,y)$

Beliebig komplexes Schachteln von Konstruktoren erlaubt:

Person ⊓ ∀hasChild.(Doctor ⊔ ∃hasChild.Doctor)

AIFB

OWL DL als DL: Übersicht Axiome

Axiom	DL Syntax	Example
subClassOf	$C_1 \sqsubseteq C_2$	Human ⊑ Animal ⊓ Biped
equivalentClass	$C_1 \equiv C_2$	Man ≡ Human ⊓ Male
disjointWith	$C_1 \sqsubseteq \neg C_2$	Male ⊑ ¬Female
sameIndividualAs	$\{x_1\} \equiv \{x_2\}$	{President_Bush} ≡ {G_W_Bush}
differentFrom	$\{x_1\} \sqsubseteq \neg\{x_2\}$	{john} ⊑ ¬{peter}
subPropertyOf	$P_1 \sqsubseteq P_2$	hasDaughter ⊑ hasChild
equivalentProperty	$P_1 \equiv P_2$	cost ≡ price
inverseOf	$P_1 \equiv P_2^-$	hasChild ≡ hasParent$^-$
transitiveProperty	$P^+ \sqsubseteq P$	ancestor$^+$ ⊑ ancestor
functionalProperty	$\top \sqsubseteq \leqslant 1P$	⊤ ⊑ ⩽1hasMother
inverseFunctionalProperty	$\top \sqsubseteq \leqslant 1P^-$	⊤ ⊑ ⩽1hasSSN$^-$

- General Class Inclusion (⊑) genügt:
  C ≡ D gdw (C ⊑ D und D ⊑ C)
- Offensichtliche FOL-Äquivalenzen
  C ≡ D ⇔ (∀x) (C(x) ↔ D(x))
  C ⊑ D ⇔ (∀x) (C(x) → D(x))

AIFB

Komplexitäten (worst-case)

OWL Variante	Datenkomplexität	Kombinierte Komplexität
OWL Full	unentscheidbar	unentscheidbar
OWL DL	unbekannt	NExptime
OWL DL ohne Nominals	NP	Exptime
OWL Lite	NP	Exptime

Datenkomplexität: nur bezüglich ABox

Kombinierte Komplexität: bezüglich ABox und TBox

AIFB

Inhalt

AIFB

Serialisierungen/verschiedene Syntax

- OWL RDF Syntax — W3C offiziell!
- OWL Abstract Syntax — W3C offiziell! siehe nächster Abschnitt
- OWL XML Syntax — W3C Dokument
- DL Schreibweise — sehr verbreitet für wissenschaftliche Arbeiten
- FOL Schreibweise — unüblich
- Für die Implementierung und das Testen von KAON2 wurde z.B. eine funktionale Schreibweise entwickelt.

Lisp-artig

AIFB

Beispiel: DL und RDF Syntax

Person $\sqcap$ $\forall$hasChild.(Doctor $\sqcup$ $\exists$hasChild.Doctor):

```
<owl:Class>
  <owl:intersectionOf rdf:parseType="collection">
    <owl:Class rdf:about="#Person"/>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="#hasChild"/>
      <owl:allValuesFrom>
        <owl:unionOf rdf:parseType="collection">
          <owl:Class rdf:about="#Doctor"/>
          <owl:Restriction>
            <owl:onProperty rdf:resource="#hasChild"/>
            <owl:someValuesFrom rdf:resource="#Doctor"/>
          </owl:Restriction>
        </owl:unionOf>
      </owl:allValuesFrom>
    </owl:Restriction>
  </owl:intersectionOf>
</owl:Class>
```

AIFB

Inhalt

OWL – Semantische Grundlagen

1. Modelltheoretische Semantik
   a. Beschreibungslogiken: ALC
   b. OWL als SHOIN(D)
   c. Serialisierungen
   d. **Wissensmodellierung in OWL**
2. Beweistheoretische Semantik
   a. Rückführung von Reasoning auf Unerfüllbarkeit
   b. Klassische Beweiser: Tableaux
   c. State-of-the-Art Beweiser via Resolution

AIFB

Wissensmodellierung in OWL

Beispielontologie und –schlussfolgerungen unter http://owl.man.ac.uk/2003/why/latest/#2

- Dient auch als Beispiel für OWL Abstract Syntax.

```
Namespace(a = <http://cohse.semanticweb.org/ontologies/people#>)
Ontology(
    ObjectProperty(a:drives)
    ObjectProperty(a:eaten_by)
    ObjectProperty(a:eats inverseOf(a:eaten_by) domain(a:animal))
    …
    Class(a:adult partial annotation(rdfs:comment "Things that are adult."))
    Class(a:animal partial restriction(a:eats someValuesFrom (owl:Thing)))
    Class(a:animal_lover complete intersectionOf(restriction(a:has_pet
        minCardinality(3)) a:person))
…)
```

AIFB

Wissensmodellierung: Beispiele

Class(a:bus_driver complete intersectionOf(a:person restriction(a:drives someValuesFrom (a:bus))))

bus_driver ≡ person ⊓ ∃drives.bus

Class(a:driver complete intersectionOf(a:person restriction(a:drives someValuesFrom (a:vehicle))))

Class(a:bus partial a:vehicle)

driver ≡ person ⊓ ∃drives.vehicle

bus ⊑ vehicle

- A bus driver is a person that drives a bus.
- A bus is a vehicle.
- A bus driver drives a vehicle, so must be a driver.

The subclass is inferred due to subclasses being used in existential quantification.

AIFB

Wissensmodellierung: Beispiele

driver ≡ person ⊓ ∃drives.vehicle

Class(a:driver complete intersectionOf(a:person restriction(a:drives someValuesFrom (a:vehicle))))

Class(a:driver partial a:adult)

driver ⊑ adult

Class(a:grownup complete intersectionOf(a:adult a:person))

grownup ≡ adult ⊓ person

- Drivers are defined as persons that drive cars (complete definition)
- We also know that drivers are adults (partial definition)
- So all drivers must be adult persons (e.g. grownups)

An example of axioms being used to assert additional necessary information about a class. We do not need to know that a driver is an adult in order to recognize one, but once we have recognized a driver, we know that they must be adult.

$\boxed{\exists \text{partof.animal} \sqcup \text{animal} \not\equiv \text{plant} \sqcup \exists \text{partof.plant}}$

AIFB

Wissensmodellierung: Beispiele

Class(a:cow partial a:vegetarian)
DisjointClasses(unionOf(restriction(a:part_of someValuesFrom (a:animal)) a:animal) unionOf(a:plant restriction(a:part_of someValuesFrom (a:plant))))
Class(a:vegetarian complete intersectionOf(restriction(a:eats allValuesFrom (complementOf(restriction(a:part_of someValuesFrom (a:animal))))) restriction(a:eats allValuesFrom (complementOf(a:animal))) a:animal))
Class(a:mad_cow complete intersectionOf(a:cow restriction(a:eats someValuesFrom (intersectionOf(restriction(a:part_of someValuesFrom (a:sheep)) a:brain)))))
Class(a:sheep partial a:animal restriction(a:eats allValuesFrom (a:grass)))

- Cows are naturally vegetarians
- A mad cow is one that has been eating sheeps brains
- Sheep are animals

Thus a mad cow has been eating part of an animal, which is inconsistent with the definition of a vegetarian

AIFB

Wissensmodellierung: Beispiele

Individual(a:Walt type(a:person) value(a:has_pet a:Huey) value(a:has_pet a:Louie) value(a:has_pet a:Dewey))
Individual(a:Huey type(a:duck))
Individual(a:Dewey type(a:duck))
Individual(a:Louie type(a:duck))
DifferentIndividuals(a:Huey a:Dewey a:Louie)
Class(a:animal_lover complete intersectionOf(a:person restriction(a:has_pet minCardinality(3))))
ObjectProperty(a:has_pet domain(a:person) range(a:animal))

- Walt has pets Huey, Dewey and Louie.
- Huey, Dewey and Louie are all distinct individuals.
- Walt has at least three pets and is thus an animal lover.

Note that in this case, we don't actually need to include person in the definition of animal lover (as the domain restriction will allow us to draw this inference).

Wissensmodellierung: OWA vs. CWA

OWA: Open World Assumption

Die Existenz von weiteren Individuen ist möglich, sofern sie nicht explizit ausgeschlossen wird.

OWL verwendet OWA!

CWA: Closed World Assumption

Es wird angenommen, dass die Wissensbasis alle Individuen enthält.

	Are all children of Bill male?	*No idea, since we do not know all children of Bill.*	*If we assume that we know everything about Bill, then all of his children are male.*
		DL answers	**Prolog**
child(Bill,Bob) **Man(Bob)**	**? $\models \forall$child.Man(Bill)**	**don't know**	**yes**
$\leq$ 1 child.T(Bill)	**? $\models \forall$child.Man(Bill)**	**yes**	*Now we know everything about Bill's children.*

Wissensmodellierung: Domain und Range

- ObjectProperty(xyz:has_topping
  domain(xyz:Pizza) $\top \sqsubseteq \forall$has_topping^{-}.Pizza
  range(xyz:Pizza_topping)) $\top \sqsubseteq \forall$has_topping.Pizza_topping

- Class(xyz:Ice_cream_cone partial
  restriction(xyz:has_topping someValuesFrom (xyz:Ice_cream)))
  Ice_cream_cone $\sqsubseteq \exists$has_topping.Ice_cream

- Wenn Ice_cream_cone und Pizza *nicht* disjunkt sind:
  - Ice_cream_cone wird als Pizza klassifiziert
  - …aber: Ice_cream wird *nicht* als Pizza_topping klassifiziert
  - Konsequenzen: *alle* Ice_cream_cones sind Pizzas,
    und *manche* Ice_cream ist ein Pizza_topping

Wissensmodellierung: Some Research Challenges

- Schließen mit
  - uncertainty (fuzzy, probabilistisch)
  - Inkonsistenzen (parakonsistent)
  - Regeln/Rules (machen wir noch)
  - weitere KI-Paradigmen (nichtmonotones Schließen, Präferenzen, …)
- Maintenance (updates, Infrastruktur, etc)
- Skalierbarkeit des Schließens
- …

Laufende Forschung untersucht u.a. obige Punkte!

Inhalt

Wichtige Inferenzprobleme

- Globale Konsistenz der Wissensbasis — KB $\models$ **false**?
  - Ist Wissensbasis sinnvoll?
- Klassenkonsistenz — $C \equiv \bot$?
  - Muss Klasse C leer sein?
- Klasseninklusion (Subsumption) — $C \sqsubseteq D$?
  - Strukturierung der Wissensbasis
- Klassenäquivalenz — $C \equiv D$?
  - Sind zwei Klassen eigentlich dieselbe?
- Klassendisjunktheit — $C \sqcap D = \bot$?
  - Sind zwei Klassen disjunkt?
- Klassenzugehörigkeit — $C(a)$?
  - Ist Individuum a in der Klasse C?
- Instanzgenerierung (Retrieval) „alle X mit C(X) finden“
  - Finde alle (bekannten!) Individuen zur Klasse C.

Entscheidbarkeit von OWL DL

- Entscheidbarkeit: zu jedem Inferenzproblem gibt es einen immer terminierenden Algorithmus.
- OWL DL ist Fragment von FOL, also könnten (im Prinzip) FOL-Inferenzalgorithmen (Resolution, Tableaux) verwendet werden.
- Diese terminieren aber nicht immer!

- Problem: Finde immer terminierende Algorithmen! Keine „naiven“ Lösungen in Sicht!

AIFB

Inhalt

AIFB

Rückführung auf Unerfüllbarkeit

- Wir werden Tableau- und Resolutionsverfahren für OWL DL abwandeln.
  - Genauer: Wir werden nur ALC behandeln.
- Tableau- und Resolutionsverfahren zeigen Unerfüllbarkeit einer Theorie.

→ Rückführung der Inferenzprobleme auf das Finden von Inkonsistenten in der Wissensbasis,
d.h. zeigen der Unerfüllbarkeit der Wissensbasis!

AIFB

Rückführung auf Unerfüllbarkeit/Konsistenz

- Klassenkonsistenz $C \equiv \bot$ gdw
  - KB $\cup$ {C(a)} unerfüllbar (a neu)
- Klasseninklusion (Subsumption) $C \sqsubseteq D$ gdw
  - KB $\cup$ {C $\sqcap$ $\neg$D(a)} unerfüllbar (a neu)
- Klassenäquivalenz $C \equiv D$ gdw
  - $C \sqsubseteq D$ und $D \sqsubseteq C$
- Klassendisjunktheit $C \sqcap D = \bot$ gdw
  - KB $\cup$ {(C $\sqcap$ D)(a)} unerfüllbar (a neu)
- Klassenzugehörigkeit C(a) gdw
  - KB $\cup$ {$\neg$C(a)} unerfüllbar (a neu)
- Instanzgenerierung (Retrieval) alle C(X) finden
  - Prüfe Klassenzugehörigkeit für alle Individuen.
  - Schwerer, dies gut zu implementieren!

AIFB

Inhalt

AIFB

ALC Tableauverfahren: Inhalt

- **Transformation in Negationsnormalform**
- Naives Tableauverfahren
- Tableauverfahren mit Blocking

AIFB

Transformation in Negationsnormalform

Gegeben eine Wissensbasis W.

- Ersetze $C \equiv D$ durch $C \sqsubseteq D$ und $D \sqsubseteq C$.
- Ersetze $C \sqsubseteq D$ durch $\neg C \sqcup D$.
- Wende die Regeln auf der folgenden Folie an, bis es nicht mehr geht.

Resultierende Wissensbasis: NNF(W)

Negationsnormalform von W.

Negation steht nur noch direkt vor atomaren Klassen.

$\text{NNF}(C) = C$, falls C atomar ist

$\text{NNF}(\neg C) = \neg C$, falls C atomar ist

$\text{NNF}(\neg\neg C) = \text{NNF}(C)$

$\text{NNF}(C \sqcup D) = \text{NNF}(C) \sqcup \text{NNF}(D)$

$\text{NNF}(C \sqcap D) = \text{NNF}(C) \sqcap \text{NNF}(D)$

$\text{NNF}(\neg(C \sqcup D)) = \text{NNF}(\neg C) \sqcap \text{NNF}(\neg D)$

$\text{NNF}(\neg(C \sqcap D)) = \text{NNF}(\neg C) \sqcup \text{NNF}(\neg D)$

$\text{NNF}(\forall R.C) = \forall R.\text{NNF}(C)$

$\text{NNF}(\exists R.C) = \exists R.\text{NNF}(C)$

$\text{NNF}(\neg\forall R.C) = \exists R.\text{NNF}(\neg C)$

$\text{NNF}(\neg\exists R.C) = \forall R.\text{NNF}(\neg C)$

W und NNF(W) sind logisch äquivalent.

Negationsnormalform: Beispiel

$P \sqsubseteq (E \sqcap U) \sqcup \neg(\neg E \sqcup D).$

In Negationsnormalform:

$\neg P \sqcup (E \sqcap U) \sqcup (E \sqcap \neg D).$

AIFB

ALC Tableauverfahren: Inhalt

- Transformation in Negationsnormalform
- **Naives Tableauverfahren**
- Tableauverfahren mit Blocking

AIFB

Naives Tableauverfahren

Rückführung auf Unerfüllbarkeit/Widerspruch

Idee:

- Gegeben Wissensbasis W.
- Erzeugen von Konsequenzen der Form C(a) und ¬C(a), bis Widerspruch gefunden.

AIFB

Einfaches Beispiel

C(a)

(¬ C ⊓ D)(a)

¬C(a) ist logische Konsequenz:

2. Formel in FOL: ¬C(a)∧ D(a)

daraus folgt u.a. ¬C(a)

Widerspruch ist gefunden.

AIFB

Weiteres Beispiel

C(a) ¬C ⊔ D ¬D(a)

Ableitung von Konsequenzen:

- C(a)
- ¬D(a)
- (¬C ⊔ D)(a)

Nun Fallunterscheidung

1. ¬C(a)
   Widerspruch
2. D(a)
   Widerspruch

Teilen des Tableaus in zwei *Zweige*.

AIFB

Tableau: Definitionen

- *Tableauzweig*:
  Endliche Menge von Aussagen der Form
  C(a), ¬C(a), R(a,b).
- *Tableau*: Endliche Menge von Tableauzweigen.
- Tableauzweig ist *abgeschlossen* wenn er ein Paar widersprüchlicher Aussgen C(a) und ¬C(a) enthält.
- Tableau ist *abgeschlossen*, wenn jeder Zweig von ihm abgeschlossen ist.

AIFB

Aufbau eines Tableaus

Auswahl	Aktion
$C(a) \in W$ (ABox)	Füge $C(a)$ hinzu.
$R(a,b) \in W$ (ABox)	Füge $R(a,b)$ hinzu.
$C \in W$ (TBox)	Füge $C(a)$ fr ein bekanntes Individuum a hinzu.
$(C \sqcap D)(a) \in A$	Füge $C(a)$ und $D(a)$ hinzu.
$(C \sqcup D)(a) \in A$	Dupliziere den Zweig. Füge zum einen Zweig $C(a)$ und zum anderen Zweig $D(a)$ hinzu.
$(\exists R.C)(a) \in A$	Füge $R(a,b)$ und $C(b)$ für neues Individuum b hinzu.
$(\forall R.C)(a) \in A$	Falls $R(a,b) \in A$, so füge $C(b)$ hinzu.

Ist das resultierende Tableau abgeschlossen, so ist die ursprüngliche Wissensbasis unerfüllbar.

Man wählt dabei immer nur solche Elemente aus, die auch wirklich zu neuen Elementen im Tableau führen. Ist dies nicht möglich, so terminiert der Algorithmus und die Wissensbasis ist erfüllbar.

AIFB

Beispiel

- P … Professor
  E … Person
  U … Universitätsangehöriger
  D … Doktorand
- Wissensbasis: $P \sqsubseteq (E \sqcap U) \sqcup (E \sqcap \neg D)$
  Ist $P \sqsubseteq E$ logische Konsequenz?
- Wissensbasis (mit Anfrage) in NNF:
  $\{\neg P \sqcup (E \sqcap U) \sqcup (E \sqcap \neg D), (P \sqcap \neg E)(a)\}$

AIFB

Beispiel (Fortsetzung)

TBox: $\neg P \sqcup (E \sqcap U) \sqcup (E \sqcap \neg D)$

Tableau:

$(P \sqcap \neg E)(a)$ (aus Wissensbasis)

$P(a)$

$\neg E(a)$

$(\neg P \sqcup (E \sqcap U) \sqcup (E \sqcap \neg D))(a)$

$\neg P(a)$ | $((E \sqcap U) \sqcup (E \sqcap \neg D))(a)$

$(E \sqcap U)(a)$ | $(E \sqcap \neg D)(a)$

$E(a)$ | $E(a)$

$U(a)$ | $\neg D(a)$

D.h. Wissensbasis ist unerfüllbar, d.h. $P \sqsubseteq E$.

Das Terminierungsproblem

- Einziges Axiom: ¬Person ⊔ ∃hasParent.Person
  Abzuleiten: ¬Person(Bill)

Person(Bill)

¬Person ⊔ ∃hasParent.Person(Bill)

¬Person(Bill) | **∃hasParent.Person(Bill)** ← ⊔

STOP

hasParent(Bill,x_1)
Person(x_1) ← ∃

¬Person ⊔ ∃hasParent.Person(x_1)

¬Person(x_1) | **∃hasParent.Person(x_1)** ← ⊔

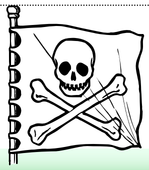
STOP

hasParent(x_1,x_2)
Person(x_2) ← ∃

¬Person ⊔ ∃hasParent.Person(x_2)

¬Person(x_2) | **∃hasParent.Person(x_2)** ← ⊔

STOP



etc.

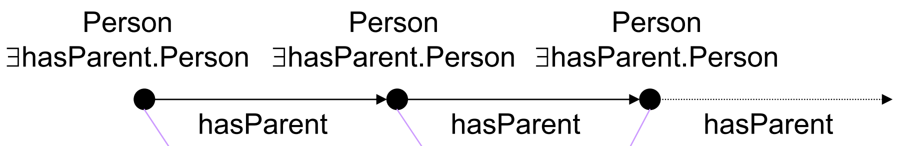
Problem tritt auf durch Existenzquantoren (und minCardinality)

ALC Tableauverfahren: Inhalt

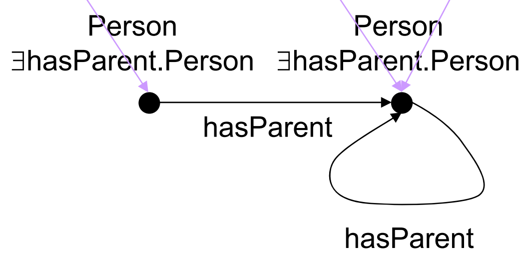
- Transformation in Negationsnormalform
- Naives Tableauverfahren
- **Tableauverfahren mit Blocking**

Lösung des Terminierungsproblems

- Wir haben folgendes konstruiert:



- Folgendes wäre aber auch denkbar:



Blocking!

D.h. Wiederverwendung alter Knoten!
Es muss natürlich formal nachgewiesen werden, dass das ausreicht!

Tableau mit Blocking

- Einziges Axiom: ¬Person ⊔ ∃hasParent.Person

Abzuleiten: ¬Person(Bill)

Person(Bill)

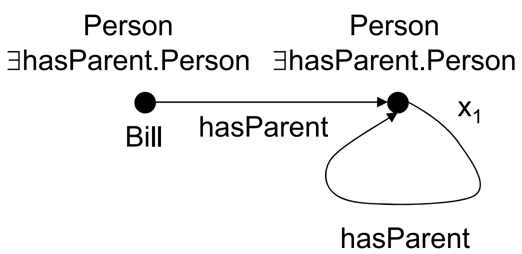
¬Person ⊔ ∃hasParent.Person(Bill) ← ⊑

¬Person(Bill) | **∃hasParent.Person(Bill)** ← ⊔

hasParent(Bill,x_1)
Person(x_1) ← ∃

¬Person ∪ ∃hasParent.Person(x_1) ← ⊑

¬Person(x_1) | **∃hasParent.Person(x_1)** ← ⊔



σ(Bill) = { Person,
¬Person ⊔ ∃hasParent.Person,
∃hasParent.Person }
σ(x_1) = { Person,
¬Person ⊔ ∃hasParent.Person,
∃hasParent.Person }
σ(x_1) ⊆ σ(Bill), so Bill blocks x_1

AIFB

Blocking

Die Auswahl von $(\exists R.C)(a)$ im Tableauzweig A ist *blockiert*, falls es ein Individuum b gibt, so dass $\{C \mid C(a) \in A\} \subseteq \{C \mid C(b) \in A\}$ ist.

Zwei Möglichkeiten der Terminierung:

1. Abschluss des Tableaus.
   Dann Wissensbasis unerfüllbar.
2. Keine ungeblockte Auswahl führt zu Erweiterung.
   Dann Wissensbasis erfüllbar.

AIFB

Beispiel

- F … Frau
  h … hatMutter
  V … Vogel
  t … Tweety
- Wissensbasis $\{F \sqsubseteq \exists h.F, V(t)\}$
- Wir wollen zeigen, dass Tweety *keine* Frau ist, d.h. dass $\neg F(t)$ logische Konsequenz ist.
- Dies wird uns nicht gelingen.
  D.h. Tweety *kann* eine Frau sein.

Beispiel (Fortsetzung)

TBox: $\neg F \sqcup \exists h.F$

Tableau:

V(t) (aus Wissensbasis)

F(t) (negierte Anfrage in NNF)

$(\neg F \sqcup \exists h.F)(t)$

$\neg F(t)$ $(\exists h.F)(t)$

h(t,s)

F(s)

$(\neg F \sqcup \exists h.F)(s)$

$\neg F(s)$ $(\exists h.F)(s)$

geblockt durch t

Sowohl s als auch t fallen unter

$F, \quad \neg F \sqcup \exists h.F, \quad \exists h.F$

Keine andere Auswahl möglich.

Tableauverfahren für OWL DL

- Die Grundidee ist dieselbe!
- Kompliziertere Blockingregeln müssen verwendet werden.
- Schlechte Unterstützung von Instanzgenerierung.
- Tableau mit Blocking ist 2NExptime!
  $\rightarrow$ schlechter als nötig!

Tableaux-Beweiser

- Fact
  - http://www.cs.man.ac.uk/~horrocks/FaCT/
  - SHIQ
- Fact++
  - http://owl.man.ac.uk/factplusplus/
  - SHOIQ(D)
- Pellet
  - http://www.mindswap.org/2003/pellet/index.shtml
  - SHOIN(D)
- RacerPro
  - http://www.sts.tu-harburg.de/~r.f.moeller/racer/
  - SHIQ(D)

Inhalt

KAON2 OWL Reasoner

- Völlig neuer Ansatz
- Theorie entwickelt vor allem in Zusammenarbeit von
  - Ulrich Hustadt, Liverpool
  - Boris Motik, Karlsruhe
  - Ulrike Sattler, Manchester
- Die Entwicklung der Algorithmen war nur durch substantielle theoretische (logische) Grundlagenarbeit möglich.
- Implementierung des Grundsystems durch
  - Boris Motik (Dissertation)
- Wir besprechen die grundsätzliche Vorgehensweise.
- http://kaon2.semanticweb.org

KAON2: Grundideen

- ABox-Reasoning (Instanzgenerierung) ist wichtiger für die Praxis als TBox-Reasoning.
- Resolutionsverfahren ist hervorragend für Instanzgenerierung geeignet (siehe Prolog).

- $\rightarrow$ Resolutionsbeweiser für OWL DL?
  - Naive Versuche via FOL schlagen fehl.
  - Grund: Transformation in FOL ergibt Existenzquantoren, die in Funktionssymbole skolemisiert werden müssen.
  - Terminierung mit Funktionssymbolen nicht erzwingbar!

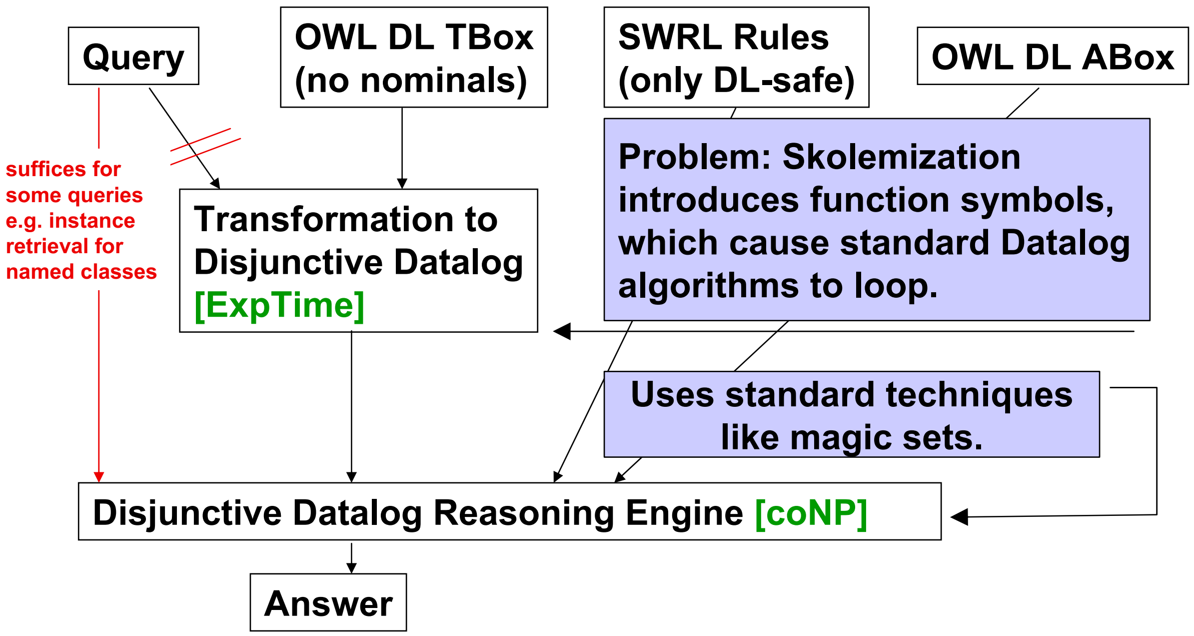
AIFB

KAON2: Vorgehensweise für Terminierung

- Endlich viele neue durch Existenzquantor erzeugte Individuen reichen für alle Konsequenzen aus.
  - Wieviele und welche?
- Zunächst Behandlung der TBox: Ziehen aller (benötigten) logischen Konsequenzen.
  - Endliche Menge!
  - Neugenerierung von Individuuen via Existenzquantoren dann nicht mehr nötig.
- Existenzquantoren (d.h. Skolemfunktionen) können dann entfernt werden!

KAON2 Reasoner Kernarchitektur

AIFB



Transformationsalgorithmus von KAON2

Vorverarbeitung: Trans(R) $\Rightarrow \forall R.C \sqsubseteq \forall R.(\forall R.C)$

Via FOL. Durch Skolemisierung entstehen Funktionssymbole!

SHIQ(D) KB → Elimination of Transitivity Axioms → Translation into Clauses → Saturation by Basic Superposition → Elimination of Function Symbols → Conversion to Disjunctive Datalog → Disjunctive Program DD(KB)

Hinzufügen mancher inferierter Klauseln. Dieser Schritt ist Exptime! Resolutionsbasiertes Verfahren.

Jetzt funktionsfrei und entscheidbar.

Ersetzen von f(x) furch neues Individuum fx. (Endlicher) Graph von f wird als neue Rolle hinzugefügt.

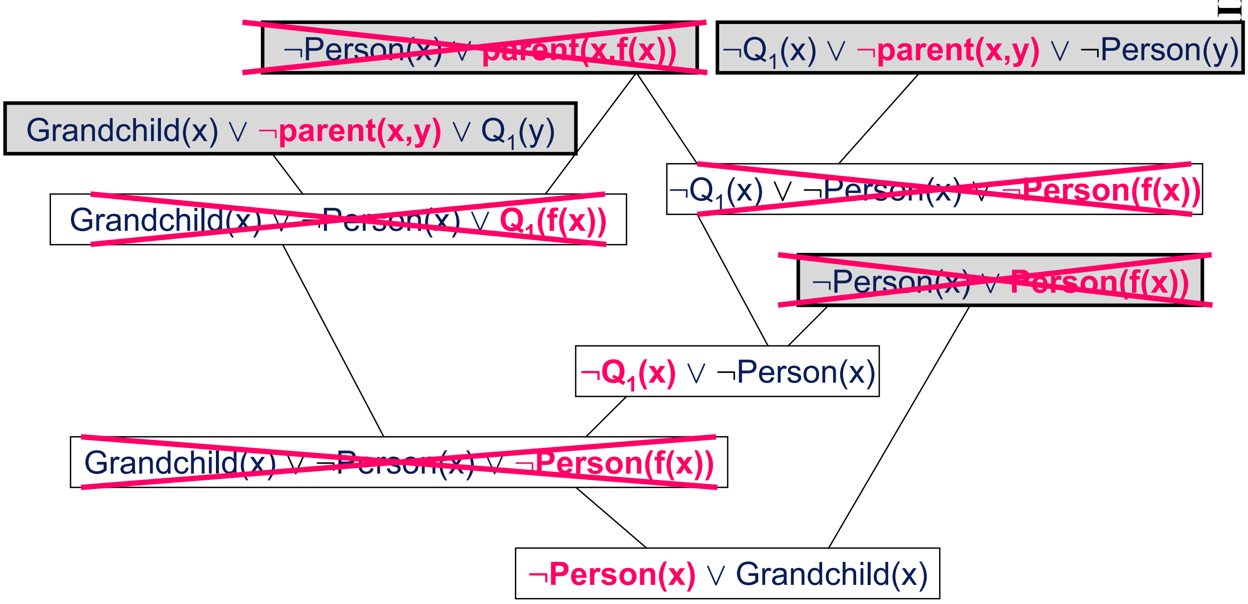
Es genügt die Behandlung der Tbox!

Einfaches Beispiel für Transformation

structural transformation & clausification

KB	FOL KB
Person $\sqsubseteq \exists$ parent.Person	¬Person(x) ∨ parent(x,f(x)) ¬Person(x) ∨ Person(f(x))
$\exists$ parent.($\exists$ parent.Person) $\sqsubseteq$ Grandchild	Grandchild(x) ∨ ¬parent(x,y) ∨ Q_1(y) ¬Q_1(x) ∨ ¬parent(x,y) ∨ ¬Person(y)
Person(a)	Person(a)

Saturierung



Translate to Datalog

Ergebnis: Datalog Programm

KB

Person ⊑ ∃ parent.Person

∃ parent.(∃ parent.Person) ⊑ Grandchild

Person(a)

DD(KB)

Q_1(x), Peson(y) ← parent(x,y)

← parent(x,y), Q_1(y), Grandchild(x)

← Q1(x), Person(x)

Grandchild(x) ← Person(x)

Person(a)

KAON2: Inferenzmechanismus

1. Übersetzung der TBox in funktionsfreie Klauseln. (Exptime!)
2. Hinzufügen der ABox.
3. Inferenzprobleme in Konsistenzcheck umwandeln.
4. Konsistenzcheck mit Standardmethoden für funktionsfreie Klauseln (z.B. magic sets). (NP-vollständig!)

- TBox braucht nur einmal behandelt zu werden!
- Algorithmus ist worst-case optimal!
- Datenkomplexität ist NP!

Nominals

- Nominals heben die Kombinierte Komplexität von Exptime auf NExptime!
- Effiziente Unterstützung durch OWL-Beweiser zur Zeit noch nicht erreicht.
- Es wird daran gearbeitet …

AIFB

Literatur

- F. Baader, D. Calvanese, D. McGuinness, D. Nardi, P. F. Patel-Schneider (eds.): The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications. Cambridge University Press, 2007. (Manche Kapitel)
- S. Staab, R. Studer (eds.): Handbook on Ontologies, Springer, 2004. (Manche Kapitel) Neue Auflage in Vorbereitung!
- W3C Dokumente (siehe Vorlesungswebseite)
- Literatur auf http://kaon2.semanticweb.org.

AIFB

Inhalt der nächsten Sitzung

I. OWL – Syntax und allgemeines Verständnis

II. Logik (Wiederholung)

III. OWL – Semantische Grundlagen

   a. Beschreibungslogiken

   b. Beweistheorie

IV. Ontologiesprache F-Logik

AIFB

Acknowledgements

For the preperation of these slides, I did not hesitate to reuse any material which I found on the web or on my computer. Some of it is derived from slides by

- last years' ISWWW lecture / Steffen Staab et al.
- Sean Bechhofer, Manchester
- Ian Horrocks, Manchester
- Boris Motik, FZI Karlsruhe
- Alan Rector et al., Manchester (OWL Pizzas)
- Denny Vrandecic, AIFB Karlsruhe
- and possibly some other people for the cases where I couldn't trace the origin of my files …