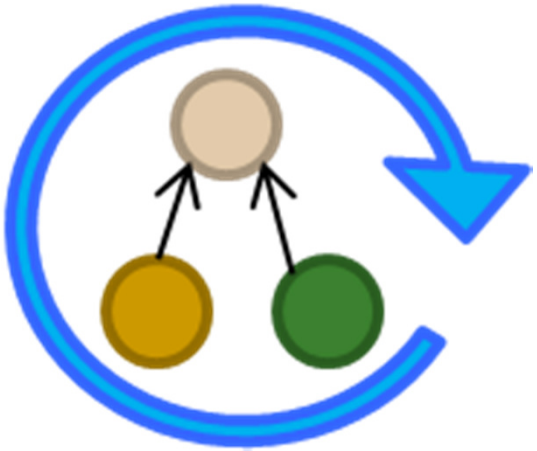
Ontologie-Management

Kapitel 6: Dynamik in Ontologien

Dr. Michael Hartung

Wintersemester 2012/13

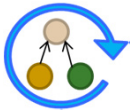
Universität Leipzig
Institut für Informatik
http://dbs.uni-leipzig.de



Inhalt

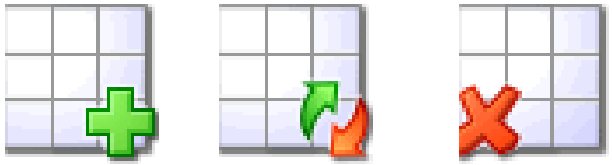
- **Einführung**
  - Warum Dynamik?
  - Beispiele und Probleme

- **Aspekte von Dynamik in Ontologien**
  - Prozess-orientierte Adaptierung von Ontologien
  - Berechnung von Diffs zwischen Ontologieversionen
  - Versionierung von Ontologien

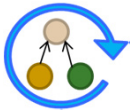


Warum Dynamik?

- **Wissen in Ontologien ist nicht statisch**
  - Ständige Änderungen / Anpassungen nötig
  - *Ziel:* möglichst aktueller / korrekter Wissenstand

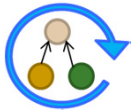


- **Gründe**
  - Integration von neuem / geändertem Domänenwissen
  - Behebung initialer Designfehler
  - Veränderte Anforderungen seitens der Nutzer
  - Umsetzung neuer Richtlinien
  - Migration zu anderer Ontologiesprache



Probleme durch Dynamik

- **Ausgangspunkt:** Veröffentlichung einer neuen Version
- **Auswirkungen**
  - Ontologie-basierte Daten wie Annotationen / Ontologie-Mappings
    - Sind Annotationen noch gültig?
    - Müssen Ontologie-Mappings angepasst werden?
  - Ontologie-basierte Analysen
    - Stimmen meine Analyseergebnisse noch oder müssen sie revidiert werden?
- **Probleme**
  - Endnutzer oftmals mit Anpassungen konfrontiert
  - Oft keine Unterstützung seitens der Ontologieprovider
  - Größe und Komplexität der Ontologien



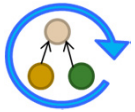
Beispiel Szenario

- **Forscher möchte Ontologie in seinen Projekten für Analysen etc. einsetzen**

Algorithmen, Werkzeuge zur Unterstützung des Forschers: Änderungsbestimmung + Evolutionsanalyse

Aspekte von Dynamik in Ontologien

- **Prozess-orientiere Anpassung von Ontologien**
  - Nutzer passt Ontologie nach seinen Vorstellungen / Anforderungen an
  - Sicherung von Konsistenz und Adaptierung abhängiger Daten
- **Berechnung eines Diff zwischen Ontologieversionen**
  - Zentrale immer wiederkehrende Aufgabe
  - Was hat sich zwischen zwei Ontologieversionen verändert?
- **Versionierung großer Ontologien**
  - Gewährleistung eines Zugriffs auf mehrere Ontologieversionen
  - Effiziente Versionierung bei großen Ontologien notwendig

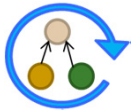


Ontologie-Evolution

Definition

Ontology evolution is the timely adaptation of an ontology to changed business requirements, to trends in ontology instances and patterns of usage of the ontology-based applications, as well as the consistent management/propagation of these changes to dependent elements. *(Stojanovic et al., 2002)*

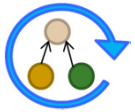
- Adaptierung (Anpassung) einer Ontologie aufgrund
  - geänderter Anforderungen
  - Trends in den zugehörigen Instanzen
  - Veränderungen im Nutzungsverhalten
- Konsistente Verwaltung / Propagierung durchgeführter Änderungen in abhängige Strukturen
- Ontologie in einen konsistenten Zustand überführen



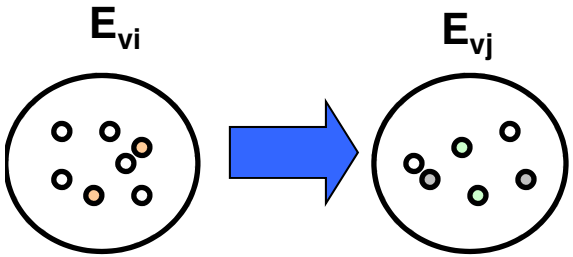
Gibt es überhaupt Evolution?

- **Framework für Evolutionsanalysen**
  - Gemeinsames Evolutionsmodell für Ontologien sowie Mappings
  - Basisänderungen *add* / *del* / *toObs* für Elemente (Konzepte, Relationen, ...)
  - Metriken zur Beurteilung der Evolution
- **Umfangreiche quantitative Analysen zwischen 2004 und 2008**
  - 16 Ontologien in den Lebenswissenschaften

Hartung, M., Kirsten, T., Rahm, E.: Analyzing the Evolution of Life Science Ontologies and Mappings. In Proc. Data Integration in the Life Sciences (DILS), 2008



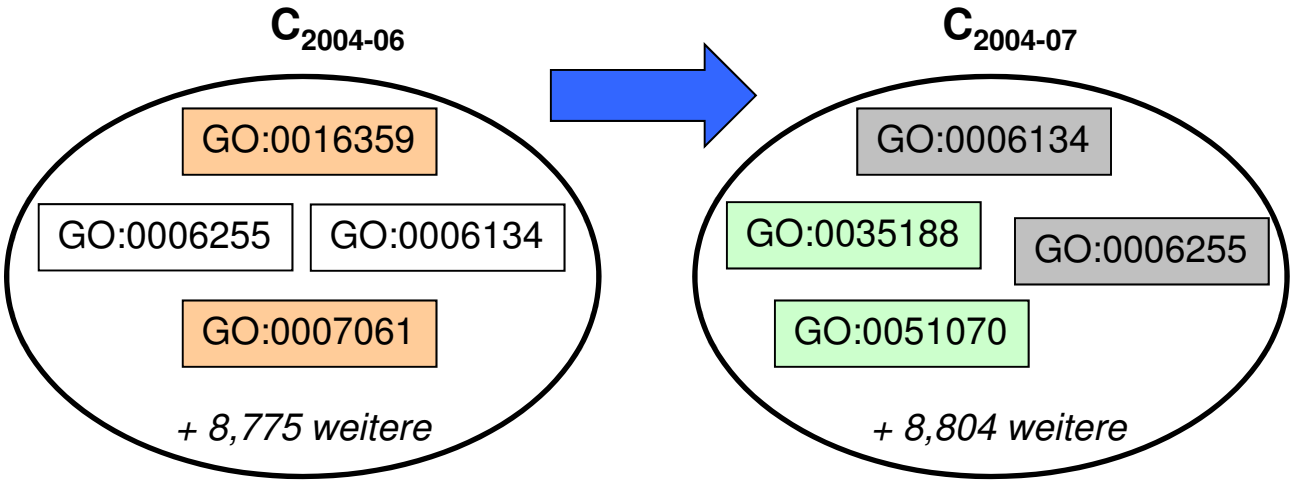
Änderungserkennung: GO-BP 2004-06 → 2004-07



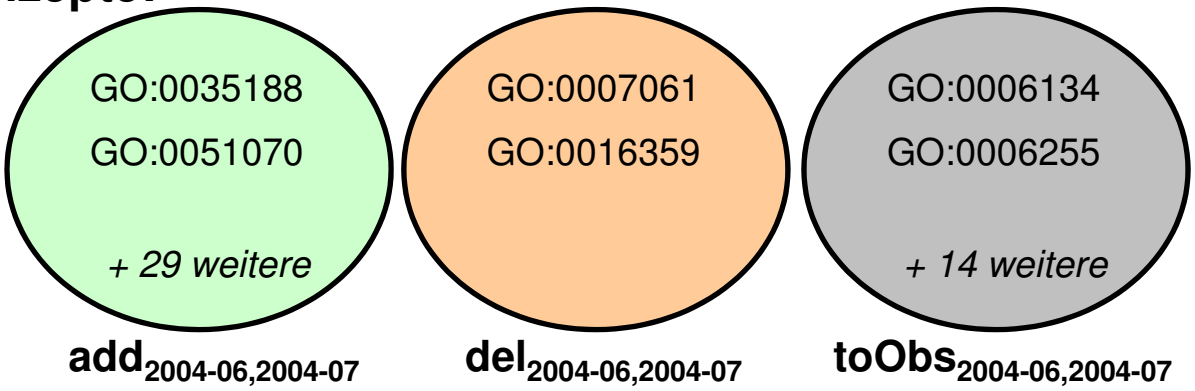
$add_{vi,vj} = E_{vj} \setminus E_{vi}$

$del_{vi,vj} = E_{vi} \setminus E_{vj}$

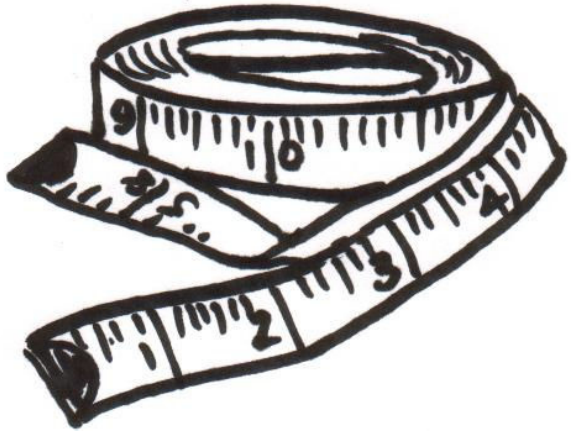
$toObs_{vi,vj} = E_{vj,obs} \cap E_{vi,nonObs}$



Betroffene Konzepte:



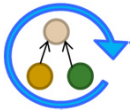
Framework: Metriken



- **Deskriptive Statistiken**
  - Anzahl von Elementen in einer Version v_i: $|E_{vi}|$
  - Anzahl innerer Konzepte und Blätter
  - Anzahl veralteter und aktiver Konzepte
  - Anzahl von is_a, part_of und anderen Relationen
  - Anzahl von Pfaden und Pfaden pro Konzept, Pfadlängen
- **Evolutions- und Wachstumsstatistiken**
  - Wachstum: $growth_{E,vi,vj} = |E_{vj}| / |E_{vi}|$
  - Anzahl geänderter Elemente: $Add_{vi,vj}$, $Del_{vi,vj}$, $ToObs_{vi,vj}$
  - Anzahl von Änderungen innerhalb einer Zeitperiode *p* für ein Zeitintervall *t*: $Add_{p,t}$, $Del_{p,t}$, $ToObs_{p,t}$

Frameworkanwendung

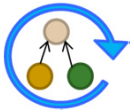
- **Vergleichende Evolutionsanalyse von 16 Ontologien**
  - Ontologien aus verschiedenen Domänen der Lebenswissenschaften
    - Gene Ontology: Funktionen, Prozesse, Komponenten
    - NCI Thesaurus: krebsbezogene Themen
    - Anatomie: Fly, Mouse, Cell, PlantStructure, Zebrafish
    - Andere: ChemicalEntities (ChEBI), MammalianPhenotype, ...
  - 386 Versionen zwischen 2004-05 und 2008-02
  - Größte Ontologien: NCI Thesaurus, GO, ChEBI (>18.000 Konzepte)



Ergebnisse und Beobachtungen *

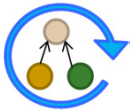
- **Signifikantes Wachstum und Änderungen in allen Ontologien**
  - Durchschnittliches Wachstum von **1.6**
    → *add* als dominierende Änderung
    - NCI Thesaurus: ~36.000 → ~64.000 Konzepte
      (627 Einfügungen / Monat)
    - Gene Ontology: ~17.000 → ~26.000 Konzepte
      (200 Einfügungen / Monat)
  - Auch viele *del* und *toObs* Änderungen
    - ChEBI (62 Löschungen / Monat)
  - Teilweise hohe Instabilitäten in den Ontologien
    → sich entwickelnde Forschungsgebiete

* Detailergebnisse: http://dbs.uni-leipzig.de/ls_ontology_evolution

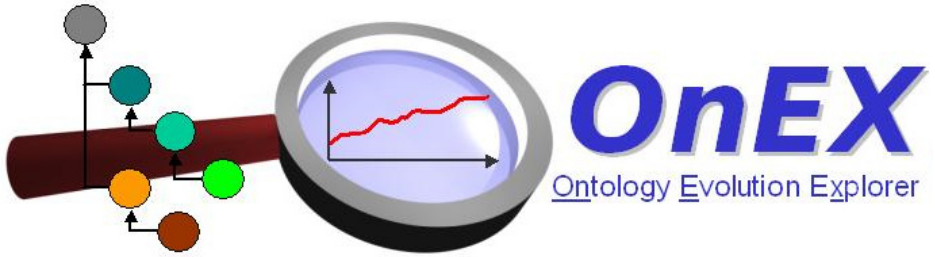


Ergebnisse und Beobachtungen (2)

- **Wachstum an strukturiertem Wissen**
  - *Relationen*
    - Anteil von *is_a* ↓ während *part_of* ↑ und *sonstige* ↑, *is_a* dominierend (86% / 7% / 7%)
  - *Innere Konzepte/Pfade*
    - Anteil innerer Konzepte ↑ → steigende Komplexität
    - starkes Wachstum in der Anzahl von Pfaden mit teils sprunghaften Änderungen (Restrukturierung von Ontologien)
- **Aktuell stark verändernd**
  - Chemical Entities of Biological Interest (ChEBI)
  - MammalianPhenotype



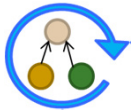
OnEX (Ontology Evolution Explorer)



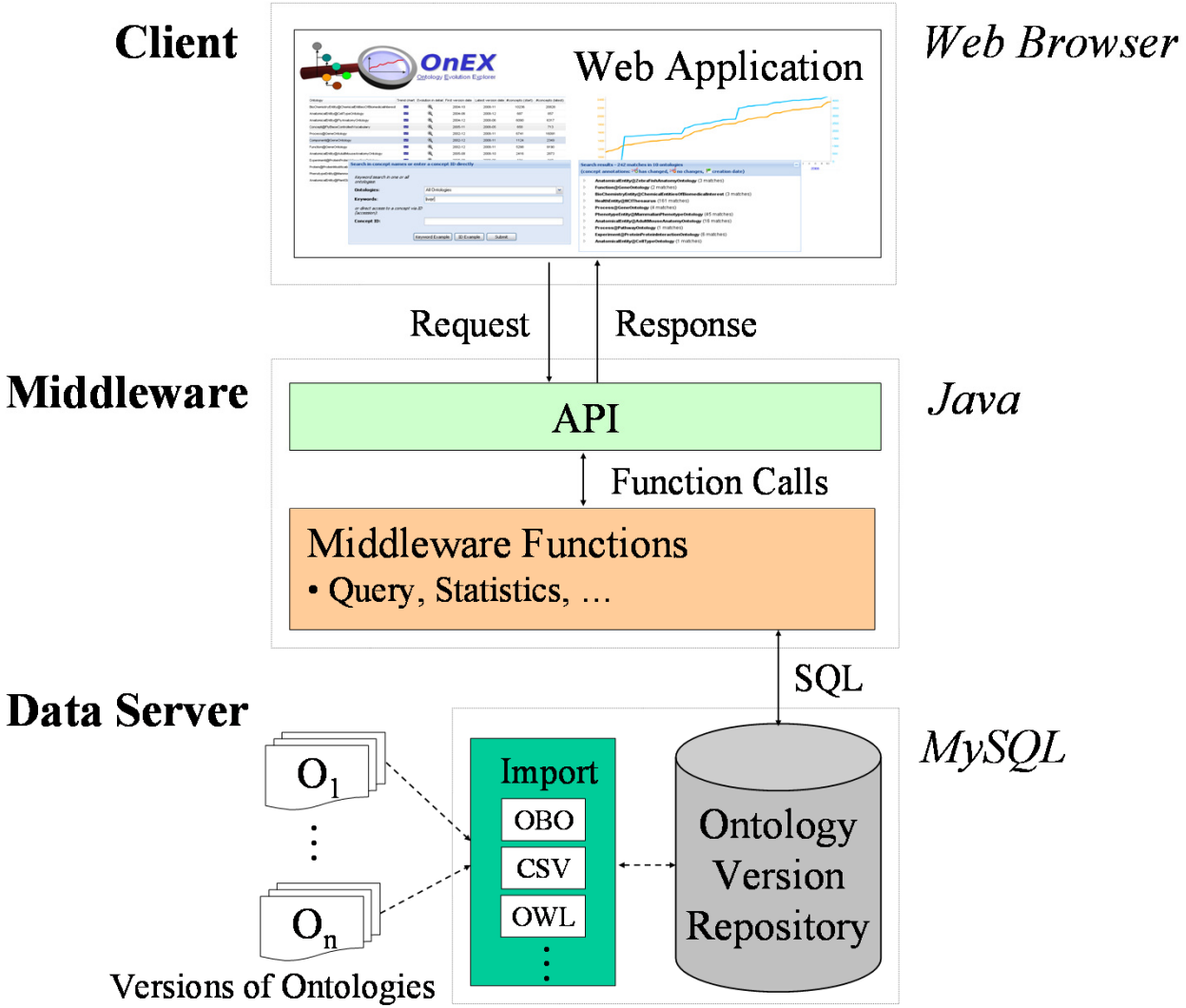
http://www.izbi.de/onex

- **Webapplikation für Online-Evolutionsanalysen**
  - Drei Workflows
    - Quantitative Evolutionsanalyse (siehe vorherige Folien)
    - Konzept-basierte Analyse
    - Annotation-Migration
- **3-Schichtenarchitektur**
- **Aktuell: 16 Ontologien mit 850 Versionen**

Hartung, M., Kirsten, T., Groß, A:, Rahm, E.: OnEX – Exploring changes in life science ontologies. BMC Bioinformatics 10:250, 2009

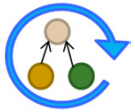


3-Schichtenarchitektur



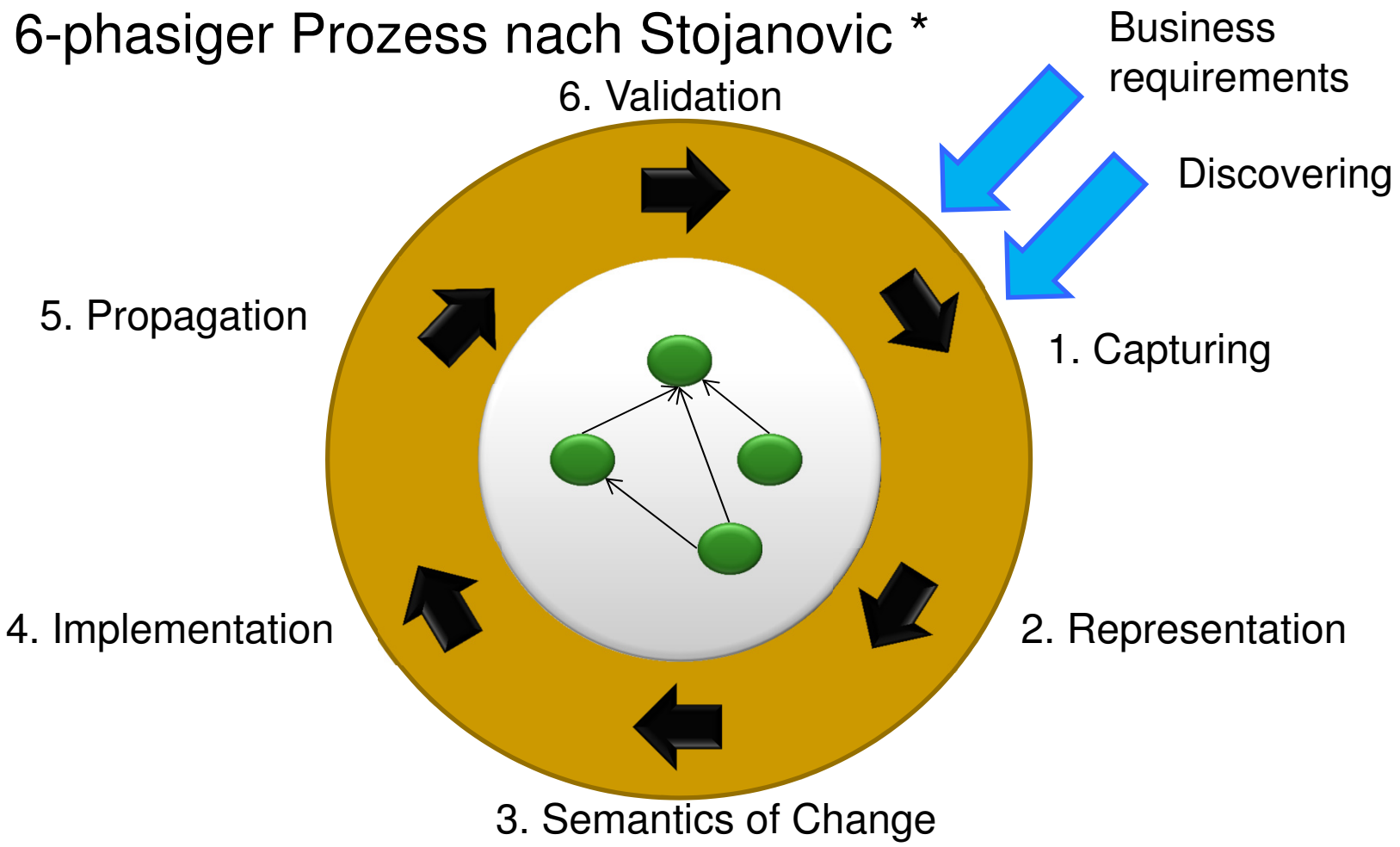
Adaptierung von Ontologien

- *Ausgangspunkt*
  - Konsistente Ontologieversion O_v welche anzupassen ist
  - Menge umzusetzender Anforderungen
- *Ziel*
  - Neue, konsistente Ontologieversion $O_{v'}$ welche die gesetzten Anforderungen erfüllt
- *Was sollte ein Ontologie-Evolutionsprozess leisten?*
  - Umsetzung/Auflösung von Änderungen sowie die Sicherung der Konsistenz der Ontologie sowie abhängiger Elemente (z.B. andere Ontologien, Instanzen, Mappings)
  - Beaufsichtigung (Eingriff, Kontrolle) durch Nutzer
  - Hinweise für weitere Veränderungen / Verbesserungen



Prozess-orientierte Ontologie-Evolution

- 6-phasiger Prozess nach Stojanovic *

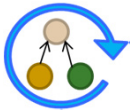


Stojanovic, L., Maedche, A., Motik, B:, Stojanovic, N.: User-driven Ontology Evolution Management. European Conf. On Knowledge Eng. and Management (EKAW), 2002

1. Capturing

- *Aufgabe*
  - Erfassung der umzusetzenden Änderungen durch Ontologiedesigner
    - aus Anforderungen direkt (business requirements)
    - durch automatische Vorschläge des Systems (discovery)

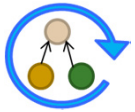
- *Beispiel*
  - Löschen eines Konzepts *C*



2. Change Representation

- *Aufgabe*
  - Umsetzung (Transformation) der erfassten Änderungen aus Phase 1 in eine formale, maschinenverständliche Form
  - Unterscheidung zwischen *einfachen* (elementaren) und *komplexen* (composite) Änderungen
    - *Einfach:* Hinzufügen, Löschen von Konzepten, Properties, Axiomen und Beziehungen
    - *Komplex:* Mergen oder Verschieben von Konzepten, Extraktion oder Kopieren von Konzepten, ...

- *Beispiel*
  - *Delete_Concept*(*C*)

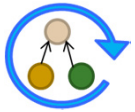


3. Semantics of Change

- *Aufgabe*
  - Identifizierung potentieller Probleme (Inkonsistenzen, „resolution points“) bei Durchführung der Änderung
  - Vorgabe vers. „evolution strategies“ zur Auflösung von Inkonsistenzen
    - Auswahl durch Nutzer
    - Automatische Entscheidung auf Basis einer globalen Strategie

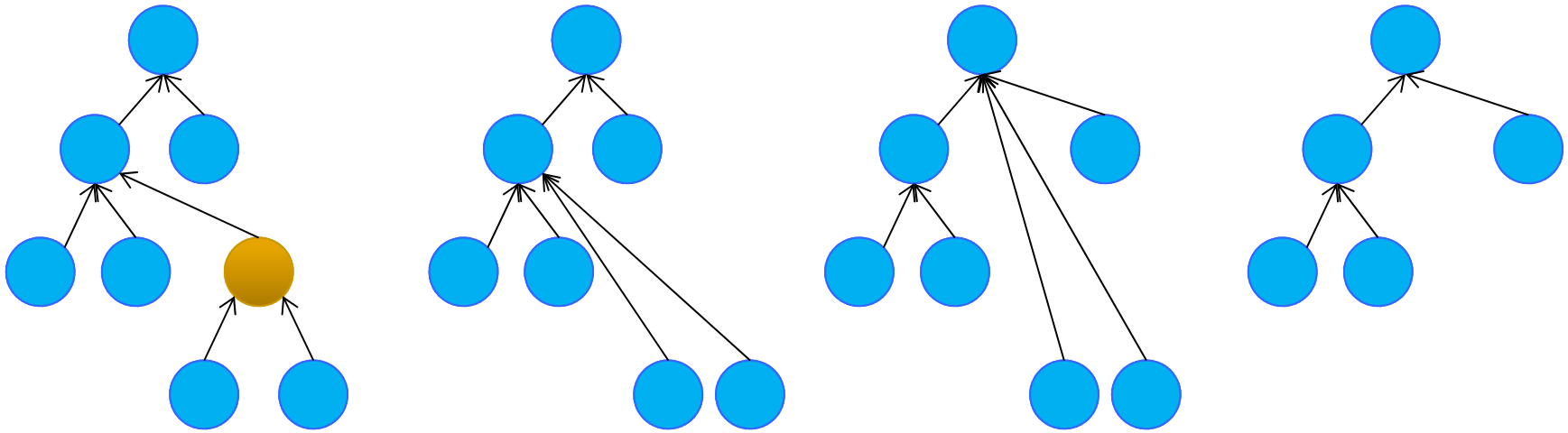
- *Beispiel*
  - *Delete_Concept*(*C*)

    → Wie wird mit „verwaisten“ Kindern (Subkonzepten) von *C* umgegangen?

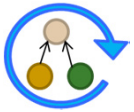


3. Semantics of Change (2)

- **Evolution strategies für *Delete_Concept(C)***



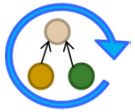
1. Einhängen unter Elternkonzept
2. Einhängen unter Wurzelkonzept
3. Ebenfalls Löschung der Kinder



4. Implementation

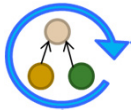
- *Aufgabe*
  - Implementierung (Umsetzung) der aus den vorherigen Phasen angesammelten Änderungen
  - Logging der umgesetzten Änderungen

- *Beispiel*
  - Umsetzung von *Delete_Concept*(*C*)
  - Je nach evolution strategy weitere Änderungen
    1. *Reconnect_to_parent*(*C*)
    2. *Reconnect_to_root*(*C*)
    3. *Delete_Subconcepts*(*C*)



5. Propagation / 6. Validation

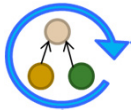
- *Aufgabe - Propagation*
  - Propagierung der Änderungen in abhängige Strukturen, z.B. andere Ontologien die veränderte Ontologie verwenden
  - Annahme: Abhängigkeiten sind bekannt → rekursive Anwendung des Evolutionsprozesses in abhängigen Ontologien
- *Aufgabe - Validation*
  - Validierung des Ergebnis der umgesetzten Änderungen durch Ontologiedesigner
  - Option zum Undo von Änderungen
  - Initialisierung eines neuen Evolutionsprozesses



COnto-Diff (Complex Ontology Diff)

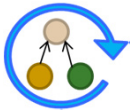
- **Probleme**
  - Einfache Änderungen oft nicht ausreichend
  - Größe der Ontologien → kompakter Diff nötig
  - Freiheiten bzgl. Modellierung, z.B. obsolete
- **Ziel**
  - Bestimmung eines vollständigen, ausdrucksstarken und invertierbaren Evolution-Mapping zwischen zwei Ontologieversionen O_{old} und O_{new}
- **Vorschlag**
  - Regelbasierter DIFF-Ansatz
  - Matching als Basis für Differenzbestimmung

Hartung, M., Groß, A., Rahm, E.: COnto-Diff: Generation of Complex Evolution Mappings for Life Science Ontologies. Journal of Biomedical Informatics, 2012



Änderungsoperationen

- **Einfach (Basis)**
  - *add*, *del*, *map* für Konzepte *C*, Attribute *A* und Relationen *R*
    - *mapC(c1,c2)*: *c1* wird durch *c2* ersetzt
- **Komplex**
  - Nicht mengenwertig
    - *substitute, toObsolete*, *move, addLeaf, delLeaf...*
  - Mengenwertig
    - *merge*, *split*, *addSubGraph*, *delSubGraph*, ...
- **Jede Operation ist invertierbar**
  - *merge({c1,c2,c3}, c3)* ↔ *split(c3, {c1,c2,c3})*
- **Jede komplexe Operation kann durch eine Menge einfacher Operationen umgesetzt werden**
  - *merge({c1,c2,c3}, c3)*
    → *mapC(c1,c3)*, *mapC(c2,c3)*, *mapC(c3,c3)*

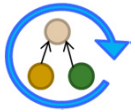


Match- und Evolution-Mappings

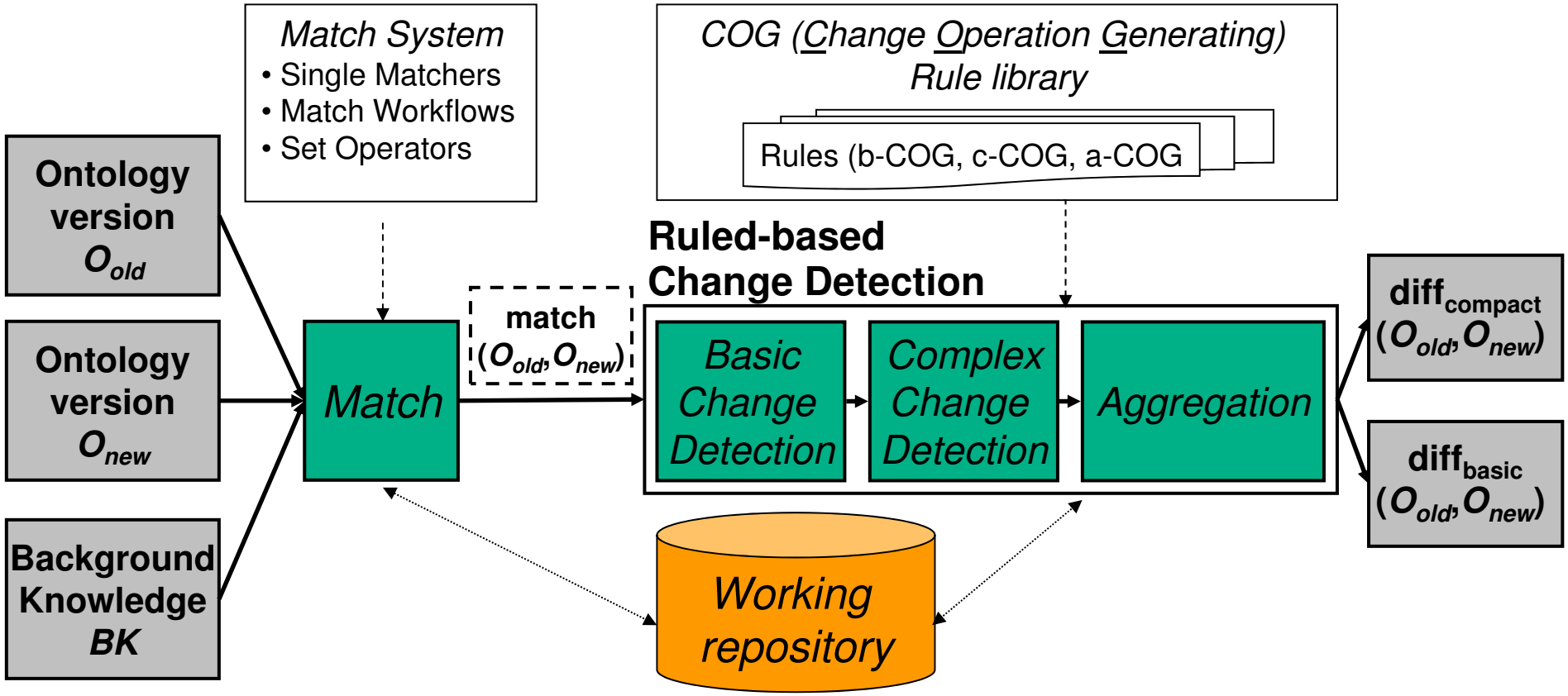
- **Mapping-basierter Ansatz**

- **Match-Mapping *match(O_{old},O_{new})***
  - Verbindet ähnliche (gleiche) Konzepte aus O_{old} und O_{new} miteinander (siehe Kapitel 5)
    - *matchC(c1,c2)*

- **Evolution-Mapping *diff(O_{old},O_{new})***
  - Änderungen zwischen O_{old} und O_{new} in Form einer Menge von Änderungsoperationen
  - Unterscheidung zwischen $diff_{basic}$ und $diff_{compact}$
    - $diff_{basic}$: nur einfache Änderungsoperationen
    - $diff_{compact}$: „so ausdrucksstark (kompakt) wie möglich“

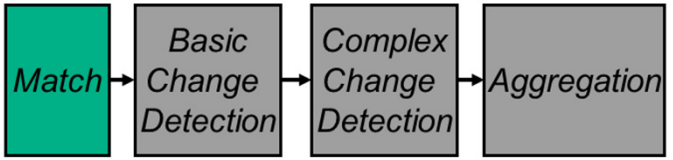


COntoDiff - Schematischer Überblick



Beispiel: „Zusammenfassen“ (*merge*) mehrerer Konzepte zwischen 2008-01 und 2008-12 in GO Biologische Prozesse

Match Phase



- *accession*-basiertes Matching

GO:0006374
Nuclear mRNA splicing via U2-type spliceosome

GO:0006375
Nuclear mRNA splicing via U12-type spliceosome

GO:0000398
Nuclear mRNA splicing via spliceosome

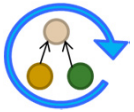
Match-Mapping

matchC(GO:0006374,GO:0000398)

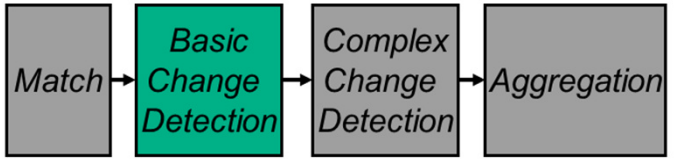
matchC(GO:0006375,GO:0000398)

matchC(GO:0000398,GO:0000398)

GO:0000398
Nuclear mRNA splicing via spliceosome
Synonyms:
- GO:0006374
- GO:0006375

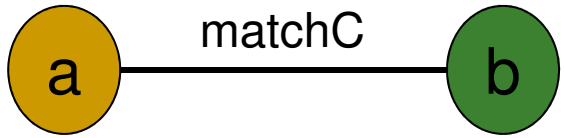


Basic Change Detection

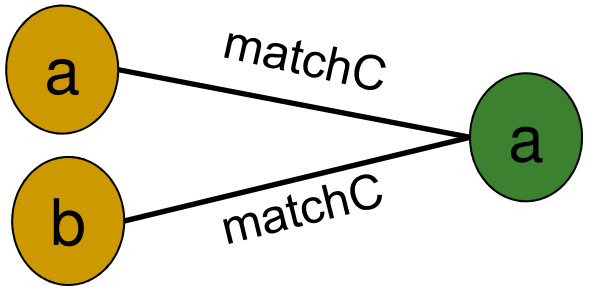


- **b-COG** Regeln (COG: Change Operation Generating)
  - Erzeugung aller einfachen Änderungen
- **Eingabe:** Ontologieversionen O_{old}/O_{new}, Match-Mapping $match(O_{old}, O_{new})$, Regelmenge $R_{b\text{-}COG}$
- **Ergebnis:** $diff_{basic}(O_{old},O_{new})$
- *merge*:

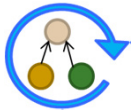
(b_3): $a \in O_{old} \wedge b \in O_{new} \wedge a \neq b \wedge matchC(a,b)$
$\rightarrow$ **create**[$mapC(a,b)$]



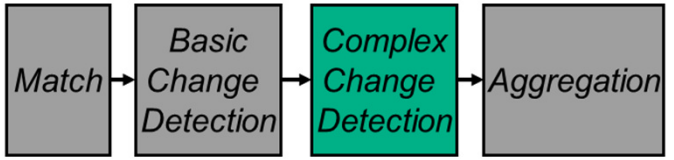
(b_5): $a \in O_{old},O_{new} \wedge matchC(a,a)$
$\wedge \exists b(b \in O_{old} \wedge matchC(b,a) \wedge a \neq b)$
$\rightarrow$ **create**[$mapC(a,a)$]



mapC(GO:0006374,GO:0000398) **über** (b_3)
mapC(GO:0006375,GO:0000398) **über** (b_3)
mapC(GO:0000398,GO:0000398) **über** (b_5)



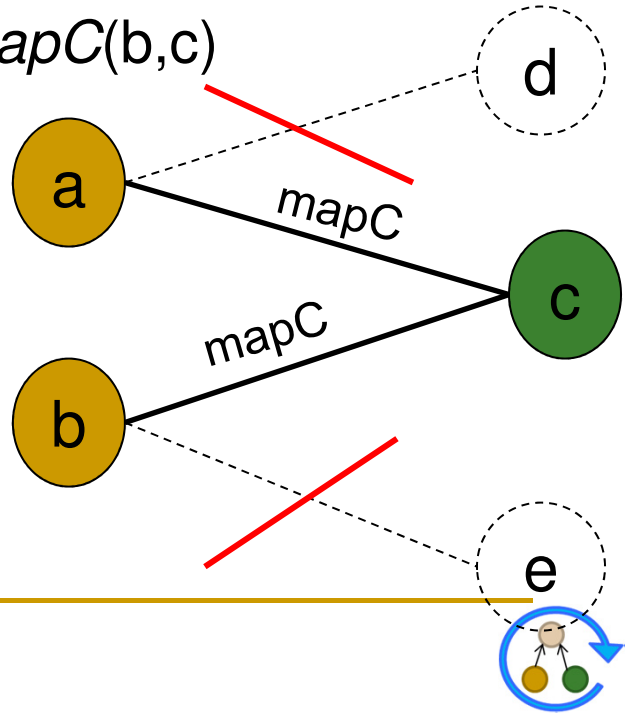
Complex Change Detection



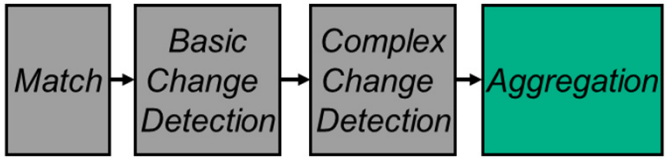
- **c-COG** Regeln
  - Erzeugung aller komplexen Änderungen
- **Eingabe:** Evolution-Mapping $diff_{basic}(O_{old}, O_{new})$, Regelmenge $R_{c\text{-}COG}$
- **Ergebnis:** $diff(O_{old}, O_{new})$
- *merge*:

$$a,b \in O_{old} \wedge c \in O_{new} \wedge a \neq b \wedge mapC(a,c) \wedge mapC(b,c)$$
$$\wedge \nexists\, d(d \in O_{new} \wedge mapC(a,d) \wedge c \neq d)$$
$$\wedge \nexists\, e(e \in O_{new} \wedge mapC(b,e) \wedge c \neq e)$$
$$\rightarrow \textbf{create}[merge(\{a\},c), merge(\{b\},c)],$$
$$\textbf{eliminate}[mapC(a,c), mapC(b,c)]$$

merge({GO:0006374},GO:0000398)
merge({GO:0006375},GO:0000398)
merge({GO:0000398},GO:0000398)

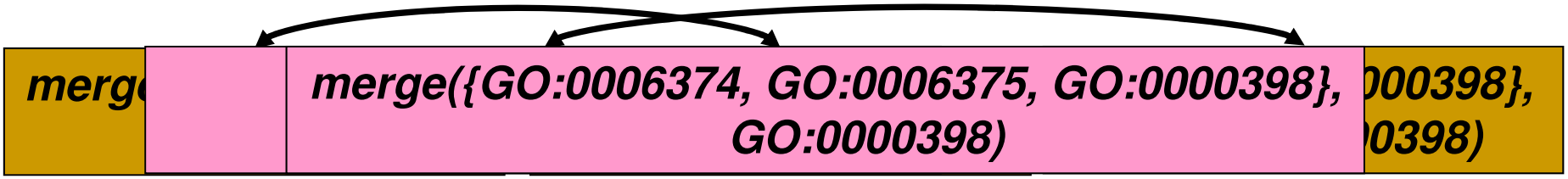


Aggregation



- **a-COG** Regeln (rekursiv anwendbar)
  - Erzeugung mengenwertiger, komplexer Änderungen
- **Eingabe:** Evolution-Mapping *diff* (O_{old}, O_{new}), Regelmenge $R_{a\text{-}COG}$
- **Ergebnis:** $diff_{compact}(O_{old}, O_{new})$
- *merge*:

  $c \in O_{new} \wedge A,B \subseteq O_{old} \wedge merge(A,c) \wedge merge(B,c) \wedge A \neq B$
  $\rightarrow$ **create**[*merge*$(A \cup B,c)$], **eliminate**[*merge*(A,c), *merge*(B,c)]

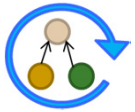


Evaluierung

- **Gene Ontology (GO)**

- **Zwei Versionsvergleiche**
  - *2008:* 2008-01 → 2009-01
  - *2009:* 2009-01 → 2010-01

O_{old} - O_{new}	$\|O_{old}\|$ (|C|,|R|)	$\|O_{new}\|$ (|C|,|R|)	|match|	$\|diff_{compact}\|$
$GO_{2008\text{-}01}$ - $GO_{2009\text{-}01}$	66.121 └ 25.774 └ 40.347	75.180 └ 27.870 └ 47.310	25.774	8.450
$GO_{2009\text{-}01}$ - $GO_{2010\text{-}01}$	75.180 └ 27.870 └ 47.310	84.714 └ 30.751 └ 53.963	27.870	4.284

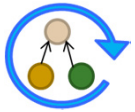


Evaluierung

- Details zu $diff_{compact}$ und $diff_{basic}$

	GO	
	2008	**2009**
|diff basic|	15.781	13.504
|diff compact|	8.450	4.284
⌊ #basic	5.594	1.671
⌊ #complex	2.856	2.613
ratio in %	**53,5%**	**31,7%**

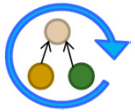
	GO	
	2008	**2009**
add	4.187	1.355
del	1.407	316
map	0	0
addLeaf	768	796
delLeaf	0	0
merge	70	83
move	1.499	1.200
substitute	0	1
toObsolete	225	66
addSubGraph	294	467
delSubGraph	0	0
∑	**8.450**	**4.284**



Speichereffiziente Versionierung

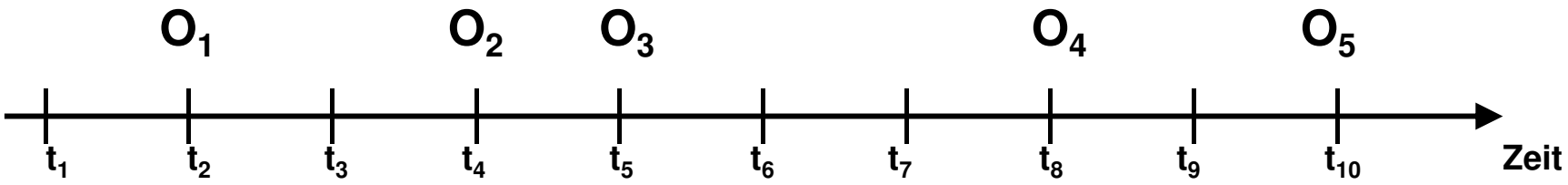
- **Problem**
  - Sehr große Ontologien (bis zu 100.000 Konzepten)
  - Versionen oft nur wenig Tage / Monate gültig
- **Speichereffiziente Versionierung erforderlich**
  - Zugang zu verschiedenen Ontologieversionen
  - Basis für Evolutionsanalysen (OnEX, ...)
- **Vorschlag**
  - Versionierung mittels Zeitstempeln für Ontologieelemente
  - Über Zeitstempel können Ontologieversionen für jeden beliebigen Zeitpunkt rekonstruiert werden
  - Vergabe / Änderung von Zeitstempeln bei Integration einer neuen Ontologieversion

Kirsten, T., Hartung, M., Groß, A:, Rahm, E.: Efficient Management of Biomedical Ontology Versions. In Proc. 4th Intl. Workshop on Ontology Content (Part of the OTM Conferences & Workshops), 2009



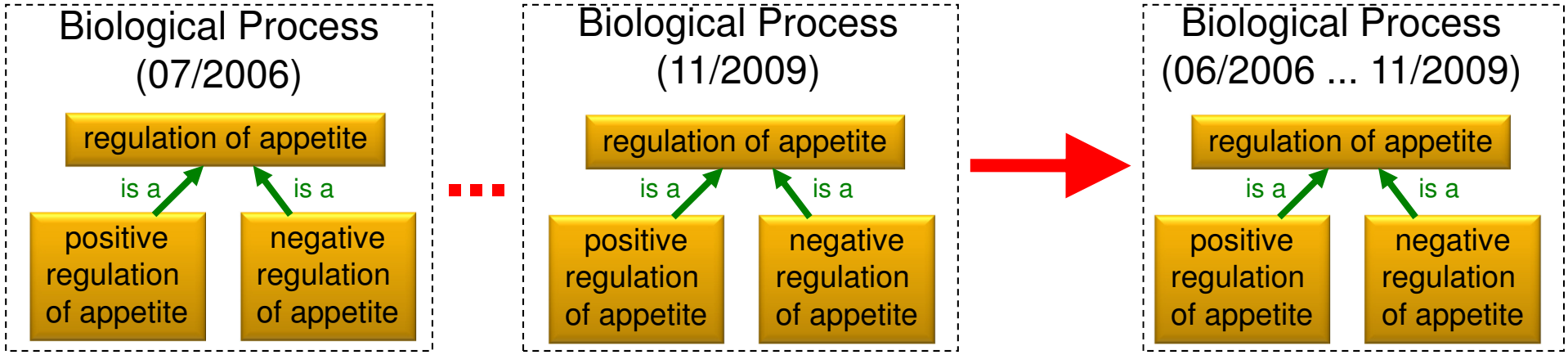
Lineares Versionierungsmodell

- **Lineares Versionierungsschema**
  - Kette von Ontologieversionen
  - Eine Ontologieversion $\mathbf{O_j}$ hat exakt eine Vor- bzw. Nachfolgeversion $\mathbf{O_{j-1}}$ bzw. $\mathbf{O_{j+1}}$
  - Erste / letzte Version bilden Ausnahmen

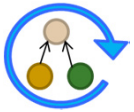


Versionierung über Zeitstempel

- **Beobachtungen**
  - Ontologiekonzepte, deren Attribute sowie Beziehungen zwischen Konzepten sind innerhalb eines bestimmten Zeitraums gültig
  - Eine Ontologieversion repräsentiert den Zustand (Snapshot) einer Ontologie zu einem konkretem Zeitpunkt t

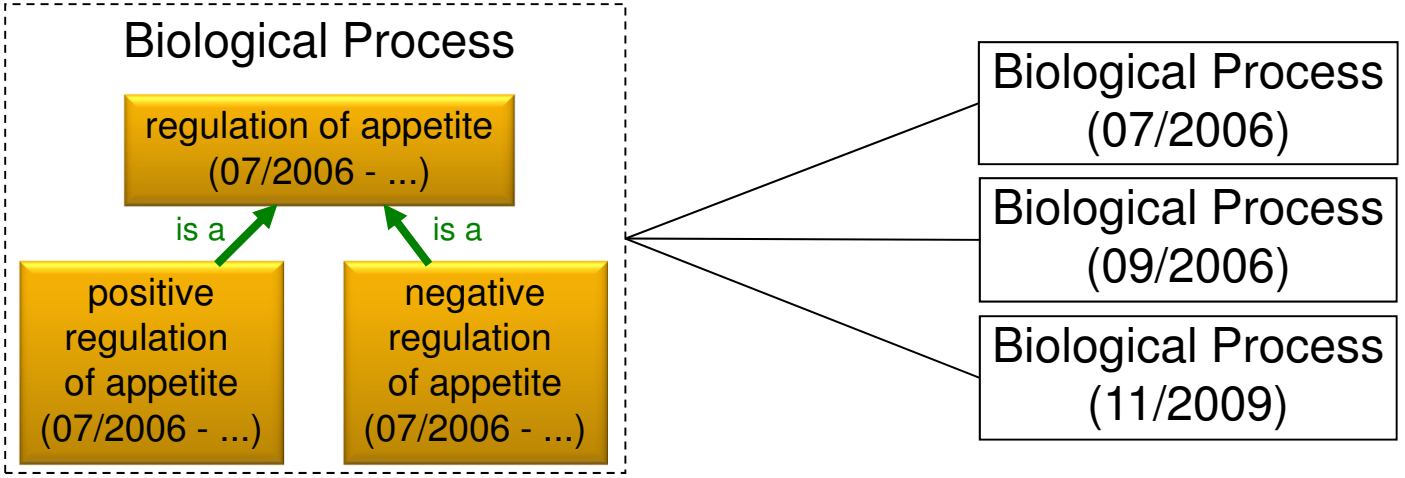


- **Idee:** Speichere Konzepte (Attribute, Beziehungen) **nur einmal** und weise einen **Gültigkeitszeitraum** zu

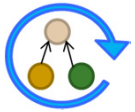


Versionierung über Zeitstempel (2)

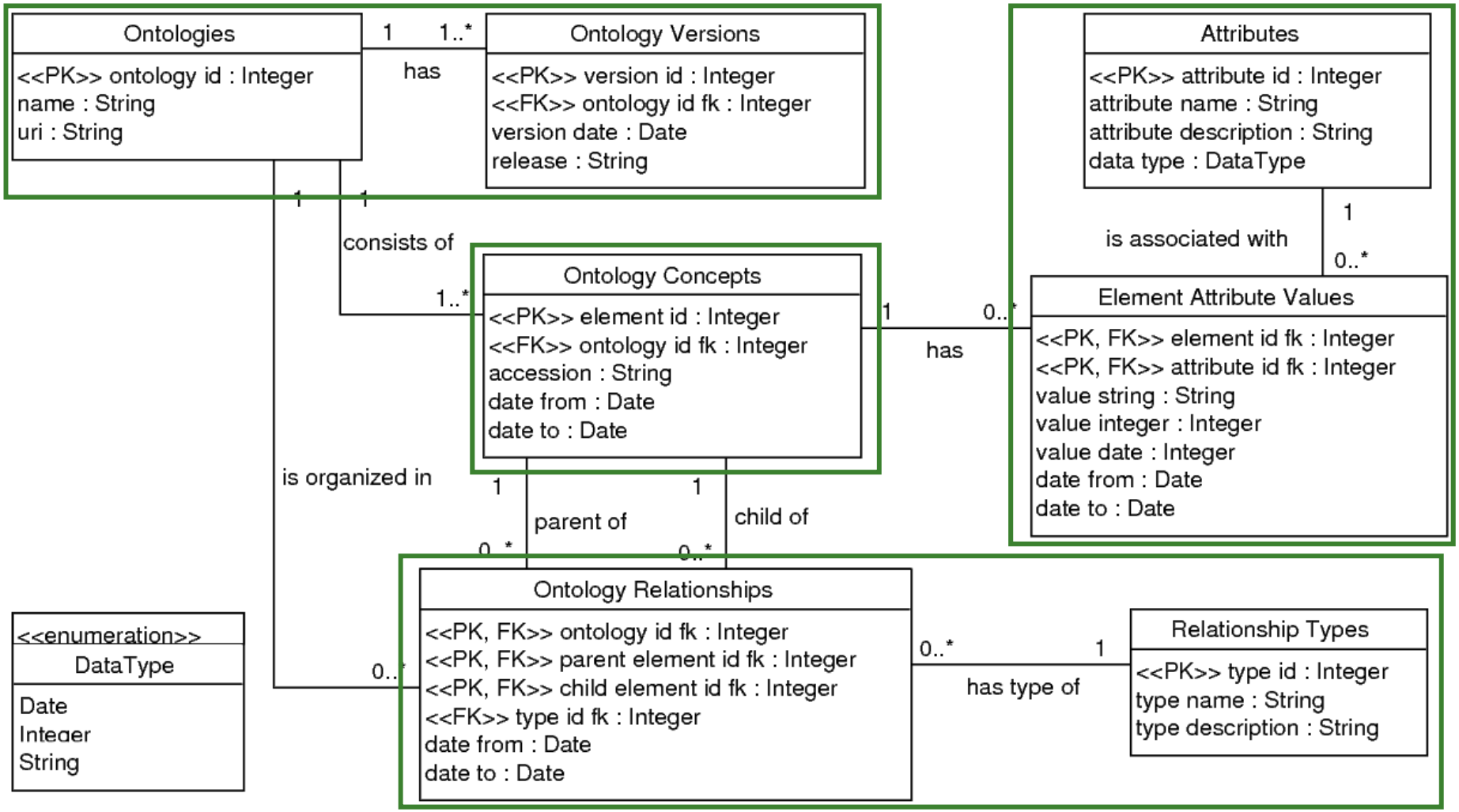
- **Zuordnung einer Lebenszeit (Gültigkeitszeitraum)**
  - Jedes Element bekommt eine Lebenszeit zugeordnet
  - t_{start} – Zeitpunkt des ersten Auftretens
  - t_{end} – Zeitpunkt des letzten Auftretens
  - Gültige Elemente zum Zeitpunkt t: $t_{start} \leq t \leq t_{end}$



- Rekonstruktion einer Ontologieversionen über t_{start} und t_{end} sowie dem Veröffentlichungsdatum der Version

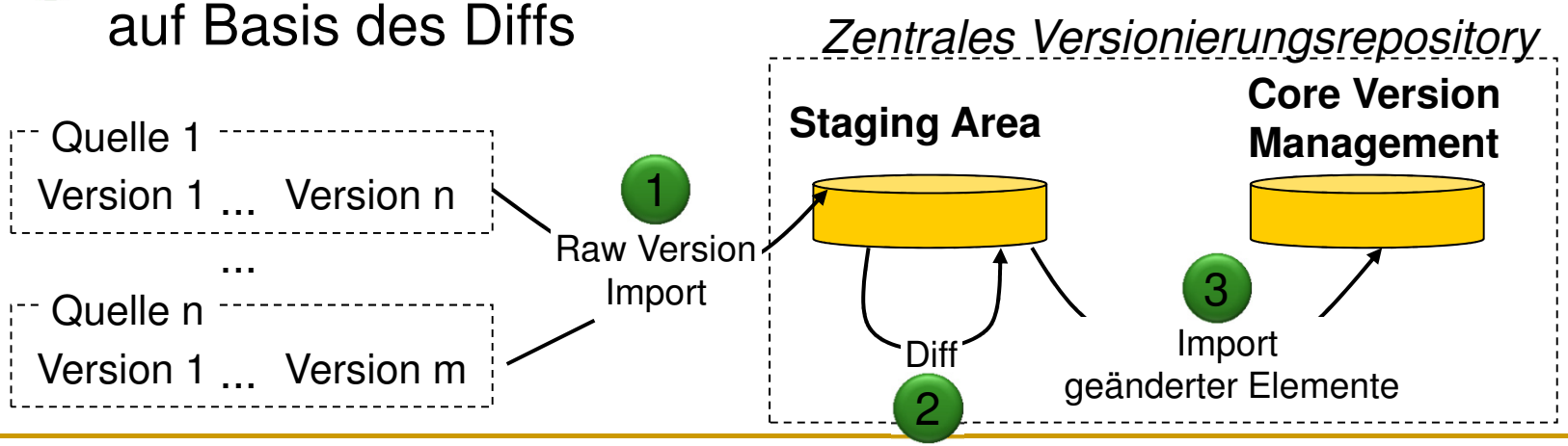


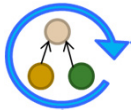
Schema für speichereffiziente Versionierung



Integration von Versionen

- **Dreiphasiger Import**
  1. Download und Integration der Originalversionen in eine Staging Area
     - Quellen: SVN, CVS, FTP, Webseiten, ...
     - Formate: OWL, OBO, XML, CSV, ...
  2. Berechnung des Diff mit der letzten aktuellen Version
     - *add* / *del* von Konzepten, Attributen, Relationships
  3. Integration neuer Elemente und Anpassung der Zeitstempel auf Basis des Diffs





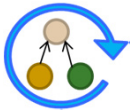
Integration von Versionen am Beispiel

- **Beispiel: Integration der GO-CC Version von 2007-06**
  - **Löschung von GO:0009572**
  - **Einfügung von GO:0000446**
  - **Namensänderung von GO:0009356**

Concepts		
accession number	*start*	*end*
GO:0009572	2002-02	**2007-05**
GO:0000446	**2007-06**	
...		

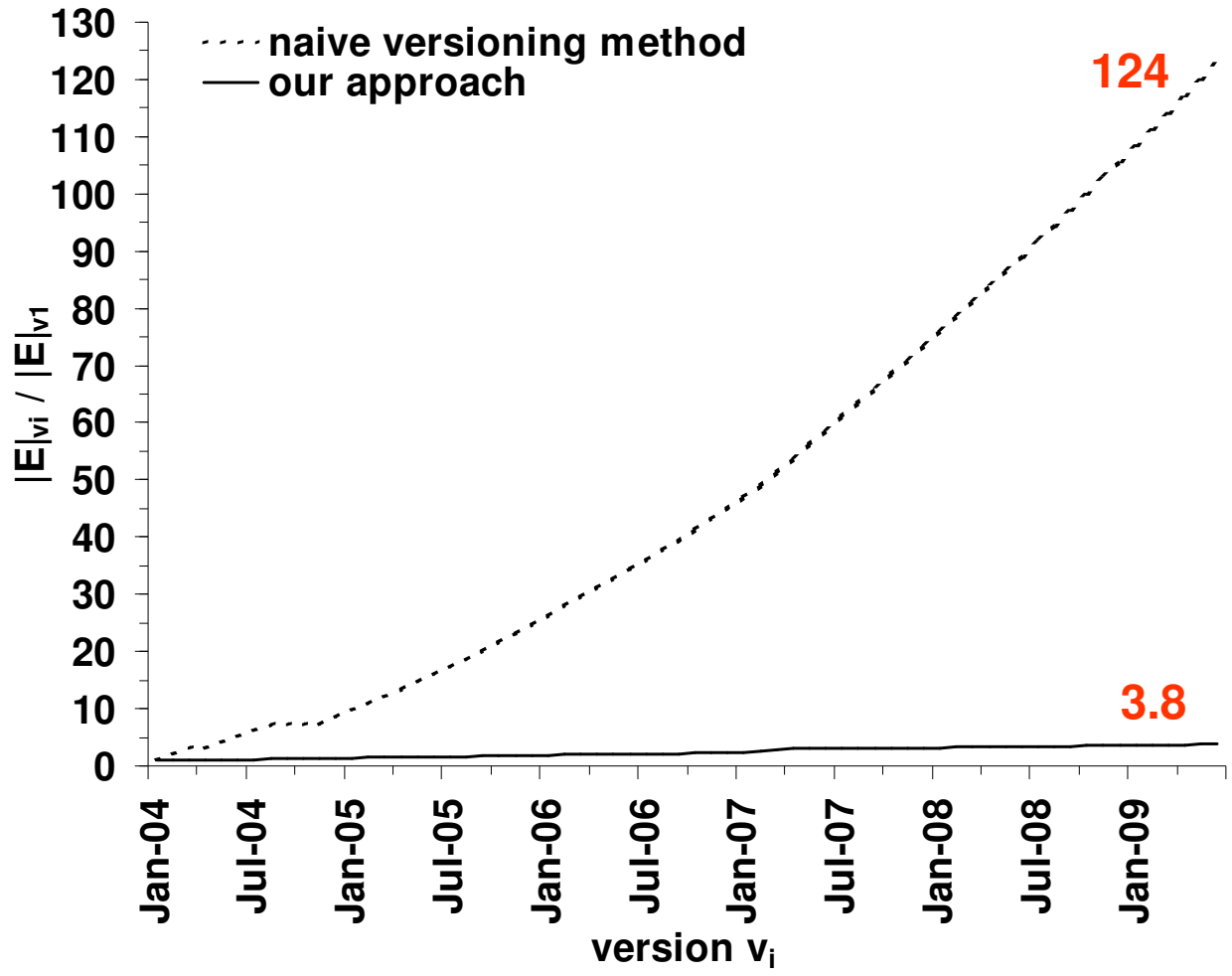
Relationships				
source	*target*	*type*	*start*	*end*
GO:0009572	GO:0044459	is_a	2006-05	**2007-05**
GO:0009572	GO:0009510	part_of	2003-05	**2007-05**
GO:0000446	**GO:0000347**	**is_a**	**2007-06**	
GO:0000446	**GO:0008023**	**is_a**	**2007-06**	

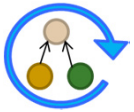
Attributes				
concept	*attribute*	*value*	*start*	*end*
GO:0009572	name	desmotubule central rod	2002-02	**2007-05**
GO:0009572	obsolete	false	2002-02	**2007-05**
GO:0000446	**name**	**nucleoplasmatic THO complex**	**2007-06**	
GO:0000446	**obsolete**	**false**	**2007-06**	
GO:0000446	**definition**	**The THO complex when ...**	**2007-06**	
GO:0009356	name	p-aminobenzoate synthetase complex	2002-12	**2007-05**
GO:0009356	**name**	**aminodeoxychorismate synthase complex**	**2007-06**	



Evaluierung – Zeitstempel vs. Naiv

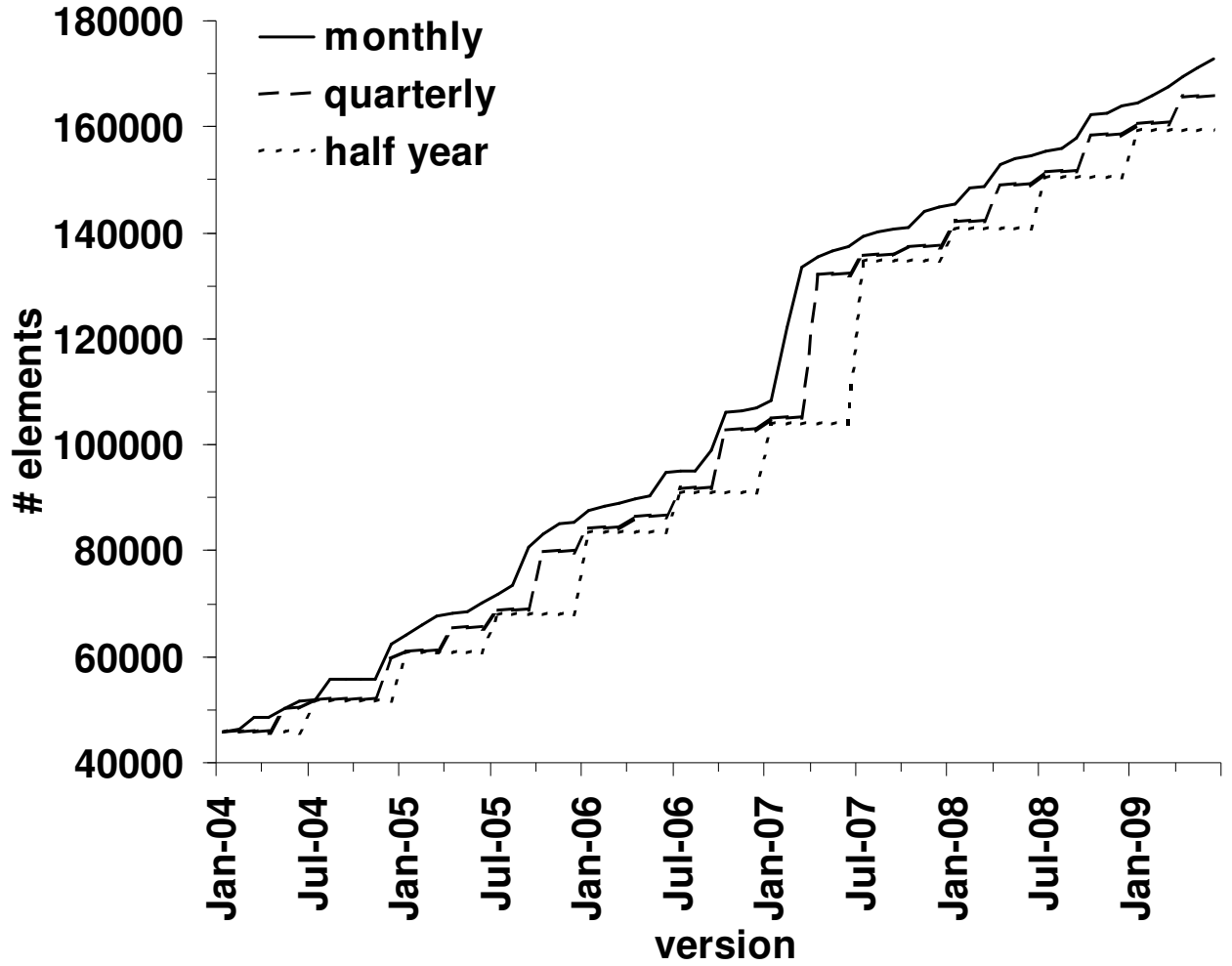
- 62 GO-BP Versionen zwischen 2004-01 und 2009-06

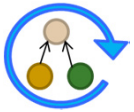




Evaluierung – Versionierungsintervalle

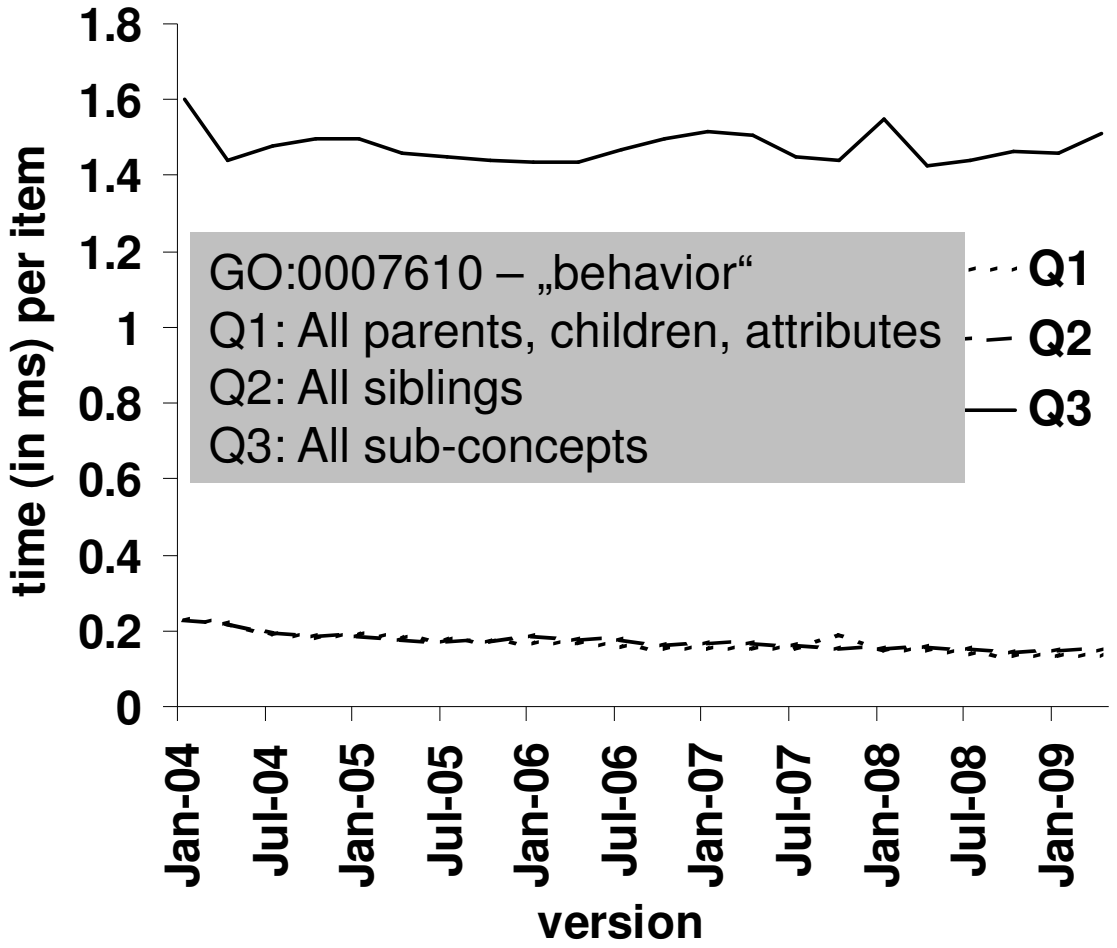
- 62 GO-BP Versionen zwischen 2004-01 und 2009-06





Evaluierung – Effizienz von Anfragen

- 62 GO-BP Versionen zwischen 2004-01 und 2009-06



Zusammenfassung

- **Dynamik in Ontologien**
  - Ontologien unterliegen ständigen Änderungen
  - Vers. Gründe für Anpassungen (Evolution)
  - Probleme durch Dynamik
    - Anpassung abhängiger Daten
    - Einfluss auf Applikationen und Analysen
- **Drei Aspekte der Dynamik von Ontologien**
  - Prozess-orientierte Anpassung von Ontologien
  - Berechnung eines Diff zwischen Ontologieversionen
  - Speichereffiziente Versionierung von Ontologien