

Ontologien und Zahnheilkunde

Eine Übersicht

Ulrich Pauls ¹

Jede lange Reise beginnt mit einem ersten Schritt
Lao-Tse 6. Jahrh. v. Chr.

Einführung

Der Begriff der Ontologie hat, vorwiegend im letzten Jahrzehnt, eine neue Deutung erfahren, die auch für die Zahnheilkunde von Belang sein wird. Ontologien im neueren Sinne sind entstanden in einer Synthese aus Beiträgen der Informationswissenschaften und der Philosophie. Sie spielen als Instrument des computerbasierten Wissensmanagements eine zunehmend wichtige Rolle in vielen wissenschaftlichen Bereichen, so zum Beispiel in den Wirtschaftswissenschaften [Zelewski 05], in den geographischen Wissenschaften [Casati 98], ganz besonders aber auch in den biomedizinischen Wissenschaften, wo auf sie heute schon in der Grundlagenforschung kaum noch verzichtet werden kann.

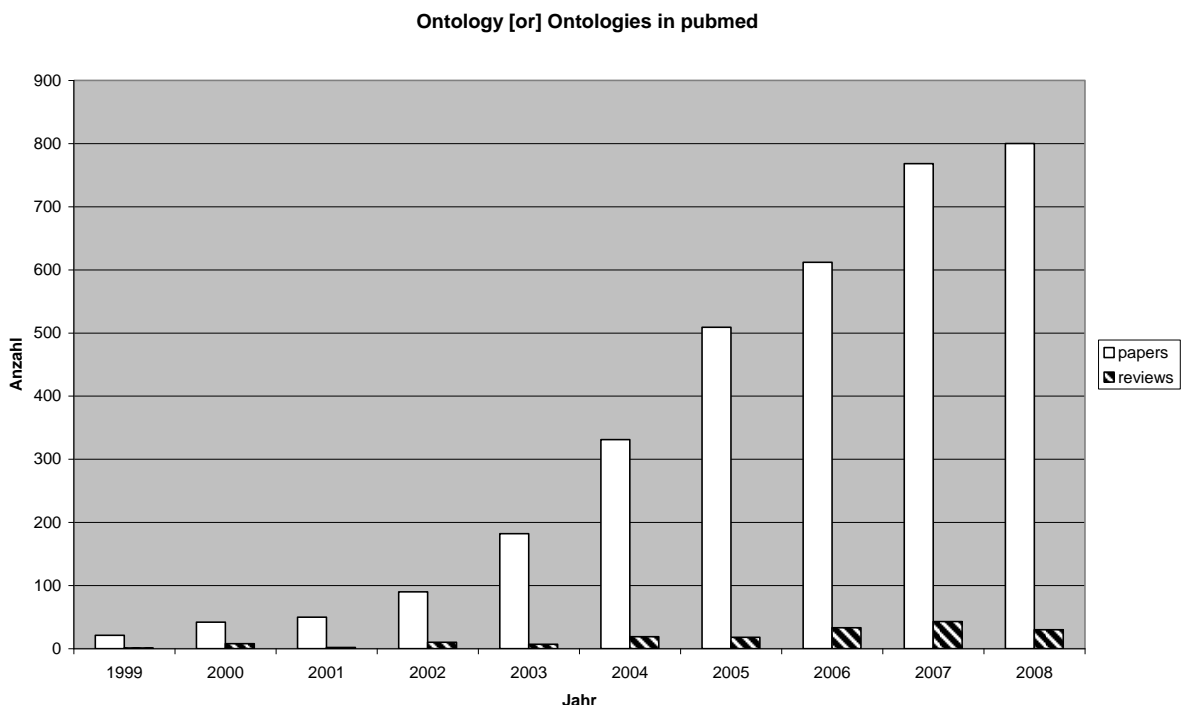


Abb.1 Vorkommen der Begriffe Ontology oder Ontologies in den Abstracts von PubMed

Ontologien bilden eine Grundlage zur Erfassung von Daten, die deren Auswertung durch Computer ermöglichen und Datenaustausch durch Vereinheitlichung der Datenstruktur und –semantik verbessern sollen. Diese Die zunehmende Relevanz des Begriffs zeigt sich etwa bei einer Analyse der

¹ Ulrich Pauls M.A. Markt 22 48683 Ahaus ulrich(at)paulscom.de

Häufigkeit des Vorkommens der Begriffe „ontology“ bzw. „ontologies“ in den abstracts bei PubMed während der vergangenen zehn Jahre. (Abb.1)

Die Prinzipien der evidenzbasierte Medizin, die in den vergangenen Jahren weltweit zunehmend auch Aufmerksamkeit in der Zahnheilkunde erfahren haben [Walther 00, EBM 09, CEBD 09, ADA 09], stoßen in ihrer Verwirklichung an Grenzen, da die „beste verfügbare externe wissenschaftliche Evidenz“ wegen Mangel an Daten oft gar nicht vorhanden ist. Dies gilt vor allem für Daten aus Zahnarztpraxen. Untersuchungen über Behandlungsergebnisse in der Praxis des niedergelassenen Zahnarztes wie zum Beispiel [Dietze 03] sind selten, da die Datenlage auf Grund unzureichender Datenstruktur und fehlender Datenkompatibilität sehr schwierig zu erschließen ist. Hier und natürlich auch im Bereich der zahnmedizinischen Forschung an Universitäten und Instituten, insbesondere auch im internationalen Austausch, könnten auf lange Sicht Ontologien helfen, die Datenlage als Basis der Evidence-Based Dentistry zu verbessern.

Philosophie

Der klassische Terminus „Ontologie“ als Teilgebiet der Philosophie, genauer der Metaphysik, wurde 1613 von Goclenius (Rudolf Göckel) in seinem „Lexicon philosophicum“ zur Bezeichnung der philosophischen Disziplin eingeführt, die sich schon seit Aristoteles, dort unter dem Namen „Erste Philosophie“ mit dem „Seienden als Seienden“ beschäftigt hat [Mittelstraß 95]; ein bedeutender Teilbereich war von Anfang an die Erfassung verschiedener Seinsarten in Kategorien und die Beschreibung der Welt in diesen Kategorien. Generationen von Philosophen, u.a. Christian Wolf, Immanuel Kant, Edmund Husserl, Nicolai Hartmann, um nur einige deutschsprachige zu nennen, haben zu diesem Thema eigene Gedanken entwickelt. Die Philosophie dient aber nicht nur als Namensgeber, sondern unterstützt durch ihre Methodik essentiell die Entwicklung effizienter Ontologien.

Informationswissenschaft

In den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts etablierte sich als Teil der damals jungen Computer- und Informationswissenschaften der Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI bzw. AI – Artificial Intelligence), der nach einer zunächst stürmischen Entwicklung in den Anfangsjahren bald in vielen Bereichen an die Grenzen des Machbaren stieß; dies war zum einen der Begrenztheit der damals zur Verfügung stehenden bescheidenen Hard- und Softwaresysteme geschuldet, unter anderem aber auch Problemen bei der Repräsentation der Außenwelt innerhalb der Computer bzw. Robotersysteme, die mit der realen Außenwelt interagieren sollten. Einer der Nestoren der KI, John *McCarthy* (der u.a. die in der KI weit verbreitete Programmiersprache Lisp entwickelte), betonte schon 1969 in einer Veröffentlichung die Relevanz der Philosophie für die KI. Nach der Zusammenfassung der damals anstehenden Probleme in Form von Fragen stellt er fest:

“These questions are identical with or at least correspond to some traditional questions of philosophy, especially in metaphysics, epistemology and philosophic logic. Therefore, it is

important for the research worker in artificial intelligence to consider what the philosophers have had to say.” [McCarthy 69]

Mitte der 1980er Jahre ist er es auch, der den Begriff der Ontologie in die Informationswissenschaften einführt:

“The ontology of a program is the set of entities that its variables range over. Essentially this is what it can have information about.” [McCarthy 84]

Der Begriff fand bald Anwendung für Wissensrepräsentationen unterschiedlicher Komplexität, vom einfachen Glossar über Thesauri und Taxonomien bis hin zu Ontologien im eigentlichen Sinne, deren Voraussetzungen bzw. Kriterien weiter unten erläutert werden.

Zwei weitere Entwicklungen trugen dazu bei, daß das Thema Ontologie in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts ein Forschungsschwerpunkt der Informationswissenschaften wurde: Zum einen erwies sich, daß die schiere Menge an Daten, die in einigen Wissenschaften, insbesondere der Genforschung, anfielen, es unabdingbar machten, eine gemeinsame, computerbasierte Plattform und eine gemeinsame Struktur für die Erfassung des Wissens zu schaffen, da sonst Austauschbarkeit und Vergleich der weltweit erhobenen Daten nicht möglich gewesen wäre. Diese Problematik, insbesondere die der fehlenden Datenkompatibilität, wird als „Turmbau zu Babel“- Problem oder „Siloproblem“ bezeichnet. Zum anderen führte die explosionsartige Entfaltung des Internets dazu, daß die Auffindung treffender Informationen immer schwieriger wurde. Auch leistungsfähige Suchmaschinen wie Google oder Metasuchmaschinen verhindern nicht die Probleme, die sich aus der Ambiguität der natürlichen Sprache oder aus Übersetzungsproblemen ergeben. Dies veranlaßte *Tim Berners-Lee*, den „Schöpfer“ des Internets, zu seiner Forderung, die Webinhalte semantisch zu hinterlegen [Berners-Lee 01]. Das „Semantic Web“ beschleunigte die Entwicklung von Ontologien nach der Jahrtausendwende noch.

Ontologien

Was also ist sind Ontologien? Die Wahl des Plurals in der Fragestellung ist nicht zufällig, gibt es doch (im Sinne der Informationswissenschaften) nicht nur eine Ontologie, sondern im Prinzip beliebig viele, die dem jeweiligen zu beschreibenden Ausschnitt der Realität und dem jeweiligen Zweck angepaßt sind. Tatsächlich wird in der Literatur häufig bewußt der Begriff im Plural verwendet, um ihn vom klassischen Ontologiebegriff der Philosophie zu unterscheiden. *Poli* unterscheidet zwischen ontology-c (c für categorical analysis) und ontology-t (t für technology) [Poli 01], *Guarino* zwischen „Big-O“ Ontology (Philosophie) und „little o“ ontology (Informatik) [Guarino 95].

Es gibt viele, unterschiedliche Definitionen des Begriffs der Ontologie im nicht-philosophischen Sinne. Dies rührt daher, daß die Entwicklung von Ontologien ein relativ junges Feld ist, in dem die Entscheidungen über die Definitionen noch nicht getroffen sind. Hinzu kommt, daß der unterschiedliche Ansatz bei

der Entwicklung von Ontologien seitens der Informationswissenschaften und der Philosophie zu unterschiedlichen Definitionen führen.

Eine frühe, häufig zitierte Definition stammt von *Tom Gruber* (damals Stanford University, Kalifornien) [Gruber 93]:

“An ontology is an explicit specification of a conceptualization”

Mit “explicit specification” ist die explizite Definition eines Begriffs in einer formalen, computerlesbaren Sprache gemeint, die „conceptualization“ bezieht sich auf Begriffe (concepts) als gedankliche Einheiten des Wissens. Gerade der Begriff der concepts hat aber in den vergangenen Jahren zu vermehrten Diskussionen, insbesondere seitens der philosophisch orientierten Ontologen geführt, die darauf bestehen, daß das Ziel der Ontologien nicht die Erfassung gedanklicher Konzepte, sondern die Beschreibung der Realität sein muß [Smith 2005/1]:

„The present essay [...] defends the thesis that ontologies developed for such purposes should be understood as having as their subject matter, not concepts, but rather the universals and particulars which exist in reality and are captured in scientific laws.”

Aus dieser Auffassung resultiert daher eine andere Definition von Ontologie [Smith 2005/1]:

„An ontology is a representational artifact, comprising a taxonomy as proper part, whose representational units are intended to designate some combination of universals, defined classes, and certain relations between them.”

Tatsächlich ist es schwierig, Sinn und Zweck von Ontologien in einem Satz zu definieren. Daher sollen keine weiteren Definitionen aus der Literatur aufgeführt werden. Statt dessen folgt eine Aufzählung dessen, was Ontologien leisten sollen:

Ontologien sind ein Gerüst, mit dessen Hilfe man das Wissen über einen bestimmten, d.h. definierten Bereich der realen Welt (Domaine, Universe of Discourse, Wissensraum) darstellen kann, und zwar dergestalt, daß es wiederverwendbar (information reuse) und unter verschiedenen Anwendern austauschbar (information sharing) ist. Kurz gesagt: Ontologien sollen helfen, die Wirklichkeit beschreiben, z.B. die Wirklichkeit in der Zahnheilkunde.

Ontologien können eine Domaine in unterschiedlicher Granularität (Mikro-Meso-Makro Welt; z.B. Vorgänge molekularer Art auf der Ebene des Immunsystems, histologische Befunde, makroanatomische Befunde) darstellen und aus unterschiedlicher Perspektive, beispielsweise wird eine „Zahnontologie“ aus Sicht des Prothetikers anders aussehen als aus Sicht des Endodontologen.

Ontologien definieren die Begriffe im Sinne eines kontrollierten Vokabulars auf eindeutige Art, um semantisch bedingte Inkonsistenzen zu vermeiden, z.B. Krone (anatomisch), Krone (künstlich) und Krone (Währung) Der Satz „Die Krone wurde für 500 Kronen mit einer Krone versorgt“ ist für uns aus dem Zusammenhang erschließbar, nicht aber für den Computer.

Ontologien bedienen sich zu dem Zwecke der Einordnung der Begriffe unterschiedlicher Ordnungssysteme, die durch Relationen beschrieben werden können (ausführlich hierzu [Smith 2005/1]), etwa Taxonomien (Beschreibung der is-a Relation oder Subsumption), Partonomien (Beschreibung der part-of Relation, Mereologische Systeme) oder anderer Relationen wie etwa die der Verursachung bzw. zeitlicher oder topologischer Art. Solche Relationen werden (meist mit Mitteln der Prädikatenlogik) axiomatisiert, beispielsweise die Subsumptionsrelation:

$$\text{is_a}(C,C') \leftrightarrow \forall c,t (\text{inst_of}(c,C,t) \rightarrow \text{inst_of}(c,C',t))$$

Dies bedeutet: Die Universalie² C ist_ein (ist subsumiert unter) C' dann und nur dann, wenn für jede Instanz c zu jedem Zeitpunkt t gilt: Wenn c zum Zeitpunkt t ein C ist, dann ist c zum Zeitpunkt t auch ein C'. Für mathematisch geschulte: Die Relation ist transitiv, reflexiv und antisymmetrisch.

In zahnmedizinischen Begriffen: Gegeben sei eine Taxonomie, in der die Universalie Teilkrone subsumiert ist unter der Universalie Krone Dann gilt, daß für *jede* Instanz der Universalie Teilkrone gelten muß, daß sie auch Instanz der Universalie Krone ist. Diese Taxonomie kann durchaus korrekt sein, dies setzt aber voraus, daß die Universalien Krone und Teilkrone entsprechend definiert sind. Betrachtet man die vagen Abgrenzungen zwischen Teilkronen, Onlays und Veneers, stellt sich dies als schwierig heraus. In vielen deutschen Prothetik-Lehrbüchern findet man gar keine Definition dessen, was eine Krone überhaupt ist; tatsächlich ist eine explizite Kronendefinition, die alle Fälle umfaßt, also exakt genug und trotzdem weit genug gefaßt ist, nicht ohne weiteres zu finden. Explizite Definitionen sind aber die Voraussetzung der Erstellung funktionierender Relationen in Ontologien.

Ontologien werden in einer formalen Sprache beschrieben, die für den Computer und, mittels geeigneter Softwaresysteme, für den Menschen lesbar sind. Dienen Ontologien auch im Wesentlichen dazu, große Datenmengen, die auf der Basis dieser Ontologien erfaßt wurden, durch den Computer auswerten zu lassen, so müssen sie doch durch den Menschen erstellt und gepflegt, d.h. dem Stand des Wissens angepaßt werden. Als formale Sprache setzt sich mehr und mehr OWL (Web Ontology Language) durch, eine Sprache auf der Basis von RDF und RDF-S³ und in XML⁴ geschrieben. Sie beruht auf Prinzipien der Prädikatenlogik 1.Ordnung und stellt einen Standard des World Wide Web Konsortiums (W3C) [W3C 09] dar. Da OWL gewisse Grenzen der Expressivität

² Universalie ist ein Begriff aus der Philosophie und bezeichnet nach Aristoteles „dasjenige, was seiner Natur nach mehreren Dingen zukommt“ [Mittelstraß 95] Im Englischen werden universal, type, kind im gleichen Sinne gebraucht. Auch der Begriff Klasse (class) wird so verwendet, wobei hier eine Verwechslung mit dem Begriff der Klasse in der Informatik, etwa dem der objektorientierten Programmierung oder dem der Ontologiesprachen vermieden werden sollte. (siehe hierzu auch [Guarino 04 , Smith 06])

³ RDF (Resource Rescription Framework) ist eine Sprache zur Beschreibung von Internet-Ressourcen, RDF-S (RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema) ein Sprache, um Vokabulare in RDF zu beschreiben und zu strukturieren. Für nähere Informationen [RDF 04]. RDF und RDF-S Spezifikationen sind Empfehlungen des W3C-Konsortiums

⁴ XML (EXtensible Markup Language) ist eine Markierungssprache, geeignet zum Datenaustausch unter unterschiedlichen Computerplattformen und im Internet. Die XML Spezifikation ist eine Empfehlung des W3C Konsortiums. [XML08]

zeigt (nicht alles, was in der ontologischen Analyse differenziert werden kann, kann in OWL ausgedrückt werden) wird es Weiterentwicklungen geben; allerdings ist in der Regel größere Expressivität mit prinzipiellen Grenzen der Berechenbarkeit (Entscheidbarkeit) verbunden, was zu pragmatischen Lösungen zwingt. Zu den Grenzen von OWL siehe [Bodenreider 06]. Einen Ausschnitt aus einer OWL Ontologie zeigt Abb. 2. Eine Reihe anderer Sprachen zur Beschreibung von Ontologien stehen zu Verfügung, für den biomedizinischen Bereich ist besonders das OBO File Format zu nennen. OBO steht für Open Biomedical Ontologies. Kriterien für OBO-Ontologien werden von der OBO Foundry festgelegt [Smith 07].

Es gibt viele Softwaresysteme zum Lesen und zur Gestaltung von Ontologien (Ontologie-Editoren), zu den bekanntesten gehören Protégé, [Pro 09] und (im biomedizinischen Bereich) OBO-edit [OBO 09]. Beide sind im Web frei verfügbar. Ebenso gibt es Programme, die zwischen den unterschiedlichen Ontologie-Sprachen übersetzen.

```

<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF
  xmlns="http://www.co-ode.org/ontologies/pizza/2005/05/16/pizza.owl#"
  xmlns:protege="http://protege.stanford.edu/plugins/owl/protege#"
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
  xmlns:daml="http://www.daml.org/2001/03/daml+oil#"
  xmlns:dc="http://purl.org/dc/elements/1.1/"
  xml:base="http://www.co-ode.org/ontologies/pizza/2005/05/16/pizza.owl">
  <owl:Ontology rdf:about="">
    <owl:imports rdf:resource="http://protege.stanford.edu/plugins/owl/protege"/>
    <owl:versionInfo rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
    >version 1.2</owl:versionInfo>
    <rdfs:comment xml:lang="en">A "final stage" that contains all constructs
    required for the various versions of the Pizza Tutorial run by Manchester</rdfs:comment>
    <protege:defaultLanguage rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
    >en</protege:defaultLanguage>
  </owl:Ontology>
  <owl:Class rdf:ID="TomatoTopping">
    <owl:disjointWith>
      <owl:Class rdf:ID="SpinachTopping"/>
    </owl:disjointWith>
    <owl:disjointWith>
      <owl:Class rdf:ID="RocketTopping"/>
    </owl:disjointWith>
    <owl:disjointWith>
      <owl:Class rdf:ID="OliveTopping"/>
    </owl:disjointWith>
    <owl:disjointWith>
      <owl:Class rdf:ID="CaperTopping"/>
    </owl:disjointWith>
    <owl:disjointWith>
      <owl:Class rdf:ID="PetitPoisTopping"/>
    </owl:disjointWith>
    <rdfs:subClassOf>
      <owl:Restriction>
        <owl:someValuesFrom>
          <owl:Class rdf:ID="Mild"/>
        </owl:someValuesFrom>
        <owl:onProperty>
          <owl:FunctionalProperty rdf:ID="hasSpiciness"/>
        </owl:onProperty>
      </owl:Restriction>
    </rdfs:subClassOf>
  </owl:Class>
  ...
  ...

```

Abb. 2 OWL_Ontologie. Es handelt sich um die ersten Zeilen der Pizza-Ontologie, die in Protégé-Kreisen zu Lehr- und Lernzwecken verwendet wird [Horridge 04]

Ontologie-Hierarchien, Top-Level-Ontologien

Die unterschiedlichen Ausgangspunkte und Voraussetzungen bei der Entwicklung von Ontologien (Domaine, Granularität, Perspektive) werfen die Frage auf, wie vermieden werden kann, daß nicht wieder das Silo-Problem auftritt, d.h. die mangelnde semantische und strukturelle Kompatibilität der unter dem Gerüst unterschiedlicher Ontologien erhobenen Daten. Hier kommt nun die Philosophie ins Spiel, die durch die Bereitstellung einer formalen Ontologie dieses Problem lösen will: Die Entwicklung unterschiedlicher (Teil-, Domain-) Ontologien unter dem Dach der formalen Ontologie soll die semantische und strukturelle Interoperabilität sichern helfen.

Der Terminus der formalen Ontologie geht auf *Husserl* zurück, der in seinen Logischen Untersuchungen schreibt:

„Es ist hier auf den Bereich von Gesetzen abgesehen, unter welchen, vermöge ihrer formalen, alle möglichen Bedeutungen und alle möglichen Gegenstände umspannenden Allgemeinheit, jede besondere Theorie und Wissenschaft steht, denen gemäß jede, wofern sie gültig ist, verlaufen muß. Vielmehr bilden jene kategorialen Theorien und Gesetze in ihrer idealen Vollendung den allumfassenden Fond, aus dem jede bestimmte, gültige Theorie die zu ihrer Form gehörigen idealen Gründe ihrer Wesenhaftigkeit schöpft: es sind die Gesetze, denen gemäß sie verläuft, und aus denen sie als gültige Theorie, ihrer „Form“ nach, vom letzten Grund aus gerechtfertigt werden kann.“ [Husserl 80/1]

Er bezieht sich auf diese Ausführungen, wenn er in Teil 2 seiner Untersuchungen den Unterschied zwischen formaler und materialer Ontologie präzisiert [Husserl 80/2]:

„Diesen [...] entsprechen ferner die „*sachhaltigen Begriffe*“ bzw. Sätze, die wir scharf unterscheiden von den „*bloß formalen Begriffen*“ und Sätzen, die frei sind von aller „*sachhaltigen Materie*“. Zu den letzteren Begriffen gehören die *formal-logischen* und die zu ihnen in Wesensbeziehung stehenden *formal-ontologischen Kategorien* [...]“

Husserl gibt nun Beispiele für formale Begriffe wie Beschaffenheit, Beziehung, Verknüpfung sowie für materiale wie Haus, Baum, Farbe und fährt fort:

„Während sich jene um die leere Idee des Etwas oder Gegenstands überhaupt gruppieren und mit ihm durch die formalen ontologischen Axiome verknüpft sind, ordnen sich letztere um verschiedene oberste sachhaltige Gattungen (*materiale Kategorien*), in denen materiale Ontologien wurzeln.“

Stammt der Terminus von *Husserl*, so ist die Idee schon älter; sie wird im allgemeinen *Leibnitz* zugeschrieben [Cocchiarella 07]. Die formale Ontologie stellt also die grundlegenden, domain-unabhängigen Kategorien bereit, definiert sie und präzisiert die Relationen der Kategorien untereinander mit den Mitteln der formalen Logik. Betont werden muß der Unterschied zwischen formaler und formalisierter Ontologie; jede Ontologie kann (beispielsweise mittels der Prädikatenlogik) explizit formalisiert werden und ist darum noch keine formale Ontologie.

Seit den 1990er Jahren wurden mehrere formale Ontologien, auch als Top-Level-Ontologien bezeichnet, zum Gebrauch im Bereich der angewandten Ontologien entwickelt. Zu nennen sind hier

- BFO⁵ (Basic Formal Ontology) [BFO], entwickelt von *Barry Smith* (IFOMIS (Institute for Formal Ontology and Medical Information Science [IFOMIS]), NCBO (The National Center for Biomedical Ontology[NCBO])) und *Pierre Grenon* (IFOMIS, eidos Centre in Metaphysics [EIDOS])
- DOLCE (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering), entwickelt von *Nicola Guarino* und Mitarbeitern (Laboratory for Applied Ontology [LAO])

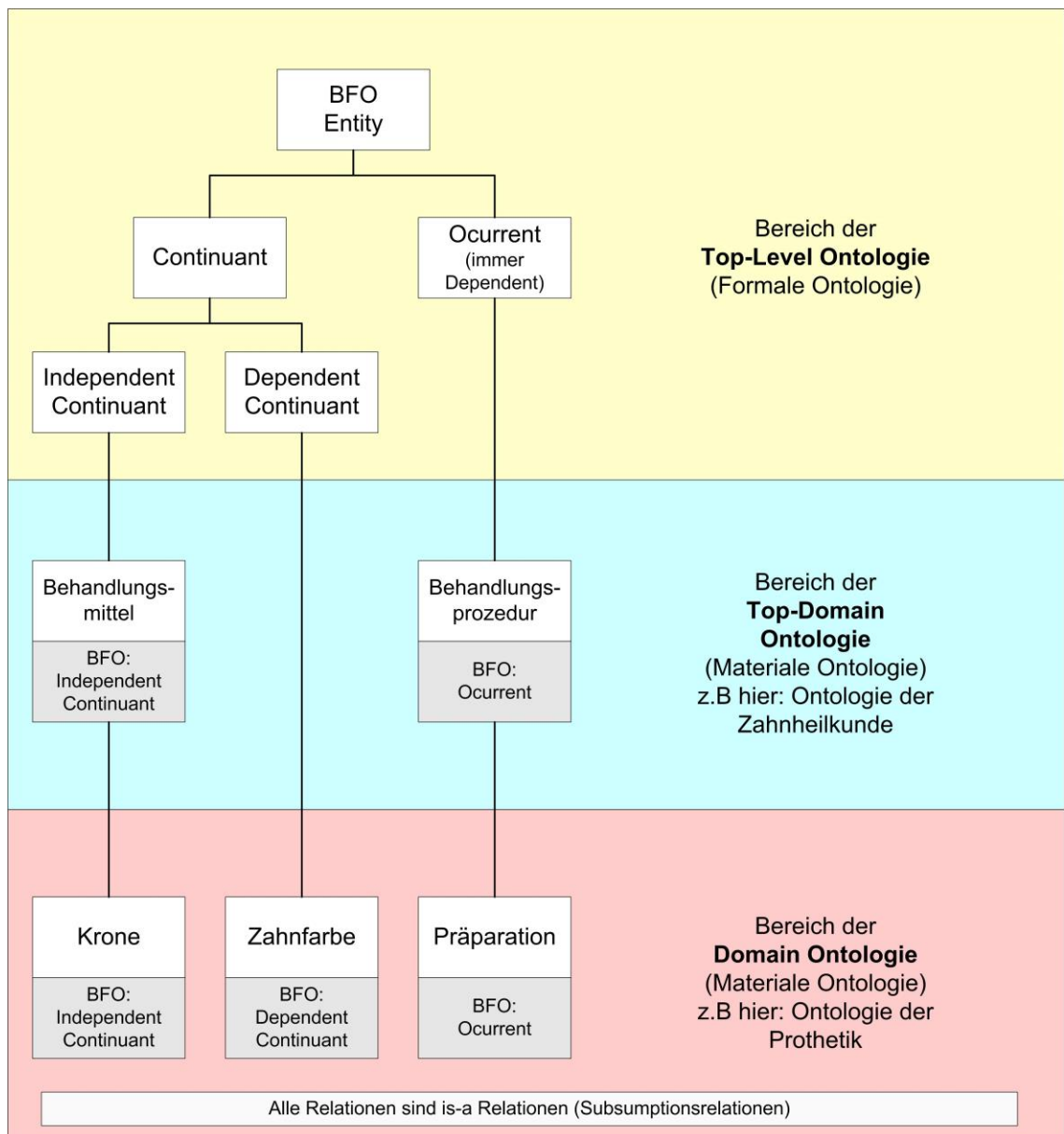


Abb.4 Ontologie-Hierarchie abgeleitet von BFO am zahnmedizinischen Beispiel

⁵ Ausgesprochen: baffo

- GFO (General Formal Ontology) [GFO], entwickelt von *Heinrich Herre* und Mitarbeitern (Onto-Med Research Group [ONTOMED])

Womit auch zugleich einige Zentren der Ontologieforschung genannt sind. Viele weitere Top-Level-Ontologien sind oder wurden entwickelt wie etwa Cyc (vom englischen encyclopedia), SUMO (Suggested Upper Merged Ontology) oder der auf Grund seiner Graphenstruktur sog. Sowa-Diamant von John F. Sowa, einem der Pioniere der Ontologieforschung [Sowa 2000]; die oben aufgelisteten zeichnen sich durch den besonderen Bezug zur biomedizinischen Forschung (BFO,GFO) oder hohe Anwendungsdichte in der Forschung (BFO,DOLCE) aus.

Diese Top-Level Ontologien bilden ein Gerüst, nach dessen Muster die Domain-Ontologien gestaltet werden. Dies soll beispielhaft an BFO gezeigt werden (Abb.4)

Das (stark vereinfachte) taxonomische Schema zeigt eine dreischichtige Hierarchie, wie sie bei der Entwicklung von Domain-Ontologien häufiger zum Einsatz kommt. Die oberste Schicht zeigt die Top-Level Ontologie, hier BFO. Diese ist tatsächlich erheblich vielschichtiger; gezeigt werden nur zwei Ebenen. Die Wurzel (root) ist die Entität (entity), ein Begriff aus der Philosophie, der alles bezeichnet, was existiert. Entitäten teilen sich auf in Continuants und Occurents. Diese Termini wurden schon 1921 durch *Johnson*⁶ geprägt [Johnson 21].

- Continuants bezeichnen Entitäten, die eine kontinuierliche Existenz in der Zeit aufweisen, ihre Identität im Wandel bewahren und, wenn sie existieren, als Ganzes existieren.
- Occurents bezeichnen Entitäten, die einen zeitlichen Ablauf aufweisen, sich phasenweise entwickeln, und nur während ihrer Phasen /Prozeßschritte existieren. Occurents sind immer abhängig von einem oder mehreren Continuants.

Diese grundsätzliche Einteilung findet sich in fast allen Top-Level-Ontologien, teilweise unter anderem Namen, z.B. Endurant/Perdurant, Substance/Process. Die Einordnung von Begriffen unter diese Kategorien ist oft einfach, kann aber auch zum Nachdenken zwingen: Jeder Mensch ist ein Continuant. Das Leben jedes Menschen ist ein Occurrent. Aber worunter fällt z.B. Epidemie?⁷

Continuants werden in Unabhängige (independent) und abhängige (dependent) unterteilt. Dependent Continuants können nicht unabhängig existieren; sie benötigen ein Independent Continuant als ihren Träger.

⁶ William Ernest Johnson, Britischer Logiker, Lehrer von Bertrand Russel und Jahn Maynard Keynes

⁷ Epidemie ist ein Continuant, Die Ausbreitung einer Epidemie ist ein Occurrent. Die Beispiele sind dem Kurs *Introduction to Biomedical Ontologies*, Barry Smith, University at Buffalo, NY, 2008, entnommen. Ein komplettes Video dieses Kurses, der zur Einführung sehr geeignet ist, findet sich unter http://ontology.buffalo.edu/smith/Ontology_Course.html , zuletzt aufgerufen 23.5.09

In der zweiten Schicht der Abbildung ist ein Ausschnitt aus einer Top-Domain-Ontologie gezeigt, hier am Beispiel einer (noch nicht existierenden) der Zahnheilkunde. In Top-Domain-Ontologien werden grundlegende Entitäten der jeweiligen Domäne definiert, wobei jede Entität von einer Top-Level-Entität subsumiert werden muß. Es handelt sich um sehr allgemeine Entitäten, die das Feld der jeweiligen Domäne strukturieren; dennoch ist die Top-Domain-Ontologie eine materiale Ontologie, da sie nicht mehr domänen-unabhängig ist. Im konstruierten Beispiel sind (zahnmedizinisches) Behandlungsmittel als Continuant und (zahnmedizinische) Behandlungsprozedur als Occurent aufgeführt. In einer ausgereiften Ontologie würden die Kategorien natürlich differenzierter ausfallen. Ein Beispiel für eine Top-Domain-Ontologie in Entwicklung ist Bio-Top [BIOTOP], eine Ontologie für die Biologie / Life Science vom Institut für Medizinische Biometrie und Medizinische Informatik der Universität Freiburg.

Die dritte Schicht zeigt die eigentliche Domain-Ontologie, wo die Entitäten erfaßt werden, mit denen – im Beispiel - der Zahnarzt im täglichen Leben zu tun hat. Wiederum ist jede Entität bezüglich der Kategorie bis in die Top-level-Ontologie verfolgbar, das heißt, jede Universalie (zur Benennung gleichartiger Entitäten) muß alle Eigenschaften der Entitäten aufweisen, unter die sie subsumiert sind. Zum Beispiel: Eine Präparation ist ein Occurent, also abhängig von einem Continuant, u.a. dem Zahn, der präpariert wird, dem Zahnarzt, der die Präparation ausführt usw.

In der Praxis wird noch häufig eine vierte Schicht hinzukommen, die der sogenannten Task-Ontologien. Es handelt sich um Ontologien für begrenzte Aufgabenbereiche, z.B. als ontologische Grundlage von Software für einen bestimmten Zweck.

Betrachtet man nun die individuelle Krone des Patienten XY, verläßt man den Bereich der Universalien und begibt sich auf die Ebene der Instanzen. Die Daten, die man über einen Patienten bei der Erhebung eines Befundes auf Basis der Ontologie erfaßt, beschreiben nicht die Universalie Krone, sondern eine Instanz der Universalie Krone, die aber zugleich alle Eigenschaften der Universalien, unter der sie subsumiert ist, aufweist. Universalien existieren in der Wirklichkeit mittels ihrer Instanzen.⁸

Relationen werden in der BFO durch die OBO Relation-Ontology [RO] definiert, siehe [Smith 05/1]. Die is-a Relation wurde oben vorgestellt. Zur Zeit sind in der RO 13 Relationen definiert, weitere Kandidaten werden diskutiert. Darunter ist eine lacks-Relation, die möglicherweise für die Feststellung fehlender Zähne nützlich sein kann [Ceusters 06].

Umfangreiche Literatur zu den Grundlagen der jeweiligen Top-Level-Ontologien ist auf den Webseiten [BFO, DOLCE, GFO] erreichbar. Eine Übersicht bietet Jansen in [Jansen 08], einen Vergleich zwischen (u.a.) DOLCE und BFO findet sich in [Masolo 03]. Darauf hinzuweisen ist, daß die Top-Level-Ontologien

⁸ Diese Auffassung basiert auf dem ontologischen *Realismus*, der im Gegensatz zum *Nominalismus* steht, der nur Einzelgegenstände als wirklich anerkennt. Die Forscher der angewandten Ontologieforschung setzen alle einen realistischen Standpunkt voraus. Eine detaillierte Einführung dazu Thema bietet Loux [Loux 06].

ständig weiterentwickelt werden, so daß die Arbeiten diese Ontologien nicht immer in ihrem heutigen Umfang bzw. Stand berücksichtigen.

Bisherige Anstrengungen: Terminologien, Thesauri, Klassifikationen, Nomenklaturen, kontrollierte Vokabulare

Das Problem der Ambiguität der Sprache hat auch schon in Zeiten weit vor der Erfindung des Computers die medizinischen Wissenschaften herausgefordert, da sich schon frühzeitig herausstellte, daß wissenschaftlicher Austausch, die Erhebung epidemiologischer Daten oder das Auffinden von Quellen in Bibliotheken ohne eindeutige Benennungen schwierig bzw. fehlerhaft ist. Ihren Ursprung haben medizinische Terminologien in Todesfallstatistiken, bei denen im England des frühen 17. Jahrhunderts erstmals Todesursachen aufgelistet wurden [Graunt 76]. Von dort aus läßt sich eine Entwicklungslinie verfolgen bis zur heutigen ICD, die weiter unten beschrieben wird. Ein weiteres Beispiel für eine frühe Nomenklatur ist die Nomina anatomica, die seit 1895 anatomische Namen ein-eindeutig definierte und eine einheitliche, weltweit benutzte Sprache (Latein) vorschrieb [Karenberg 06] ; sie findet heute ihre Fortsetzung in der zweisprachigen (Latein/Englisch) Terminologia Anatomica [Whitmore 98].

Weitere Beispiele für medizinische Terminologien/Klassifikationen sind

- die ICD (International Classification of Diseases), die auf das Jahr 1893 zurückgeht (mit Vorläufern aus dem 17. und 18. Jahrhundert) und nunmehr als Version 10 vorliegt, deutsche Version ICD-10 GM (German Modification) [ICD10],
- SNOMED_CT® (Systematized Nomenclature of Medicine -- Clinical Terms), das seine Ursprünge 1965 hat und vom College of American Pathologists über mehrere Versionen entwickelt wurde, jetzt von der IHTSDO (International Health Terminology Standards Development Organisation) weiterentwickelt wird [SNOMED],
- GALEN, ein Terminologieserver, der seit Ende der 1980er Jahre entwickelt wurde und erstmalig die Vorteile des Computers (Strukturierte Eingabe, strukturiertes Datenmodell) nutzte [GALEN].
- MeSH (Medical Subject Headings), das kontrollierte Vokabular der U.S. National Library of Medicine zur Indexierung von Artikeln in MEDLINE/PubMed [MeSH]

Aus zahnmedizinischer Sicht muß SNODENT (Systematized Nomenclature of Dentistry) erwähnt werden. SNODENT wurde von der American Dental Association (ADA) in den 1990er Jahren als Terminologie diagnostischer Begriffe entwickelt. Zu SNODENT gibt es nur wenig Literatur; in PubMed finden sich (unter dem Stichwort SNODENT) nur zwei Artikel (von insgesamt drei), die sich mit der Terminologie kritisch auseinandersetzen [Torres 06, Goldberg 05].

Inzwischen ist SNODENT als „Micro-Glossary“ in SNOMED-CT integriert und soll dort in Zusammenarbeit mit der ADA weiterentwickelt werden [IHTSDO 07].

Für Terminologien und kontrollierte Vokabulare werden Qualitätsstandards empfohlen [Cimino 98], die aus ontologischer Sicht diskutiert werden [Smith 06/2, Cimino 06, Schulz 07, Smith 08]. Ungeachtet der Differenzen wird die Qualität der vorhandenen Terminologien aus semantischer und ontologischer Sicht als unzureichend erachtet. Dies sei an einem kleinen zahnmedizinisch orientierten Beispiel aus SNOMED-CT erläutert.

SNOMED-CT ist in mehrere Taxonomie - Achsen eingeteilt, etwa für Befunde (clinical findings), Anatomische Begriffe (body structure) oder auch für Behandlungsschritte (procedures). Diese können zur Beschreibung einer klinischen Situation kombiniert werden (sog. Postkoordination). Innerhalb der Achsen sind die SNOMED_CT *concepts* (Begriffe) durch is-a Relationen miteinander verbunden (Subsumptionsrelation wie oben beschrieben). Abb.3 zeigt einen Ausschnitt aus der procedure-Achse (stark vereinfacht auf der unteren Ebene), mit dem die Eingliederung einer Brücke beschrieben werden soll. Durch das Suffix (p) ist angezeigt, daß es sich um Behandlungsschritte, um Prozeduren, und nicht um die Beschreibung der Brücke selbst handelt. Die einzelnen concepts werden hinsichtlich Methode, Ort usw. in den „Attributes“ weiter spezifiziert, wobei die Spezifikationen anderen Achsen entnommen und entsprechend gekennzeichnet (qv,po usw.) werden. Dies ist hier nur für das concept „Bridge pontic“ gezeigt. Attributes bilden also die Relationen zwischen den unterschiedlichen Achsen.

Ausgedrückt werden soll folgendes: Das Eingliedern (insertion-action (qv)) eines Brückengliedes (Bridge pontic (p)) ist eine „Fixed prosthodontic procedure(p)“. Sie erfolgt mittels einer Brücke (Bridge-dental (physical object)) an dem Ort Mundhöhle (Oral cavity structure (body structure)). Weiter ausgedrückt werden soll, daß die Eingliederung einer Brücke auch die Eingliederung einer oder mehrerer Kronen (im Beispiel einer Edelmetall-Vollgußkrone) und eines Brückengliedes (im Beispiel eines Edelmetall-Vollgußbrückengliedes) beinhaltet. So ist es gemeint, so steht es aber dort nicht. Statt dessen steht dort, daß der Prozeß der Eingliederung einer Krone (crown...(p)) ein Prozeß der Eingliederung eines Brückengliedes (Bridge pontic (p)) ist.

Hier tauchen verschiedene Probleme auf: Ein Brückenpontic gliedert man nicht isoliert ein, sondern immer eine Brücke als Ganzes. Dies gilt aus funktioneller Sicht auch für geschiebegeteilte Brücken. Anstatt „Bridge pontic“ müßte es also Bridge oder Bridgework heißen. Das allein löst aber noch nicht das Problem der is-a Relation zu der unteren Ebene. Tatsächlich müßte dies eine part-of Relation sein: Der Prozeß des Eingliederns einer Brücke besteht aus dem Eingliedern von Kronen und Brückengliedern oder umgekehrt: Das Eingliedern einer Krone *kann* Teil des Eingliederns einer Brücke sein (crown...(p) part-of bridge (p)), dies gilt aber natürlich nicht für Einzelkronen.

Es gibt einige Veröffentlichungen, die diese Art von Problemen im Bereich von SNODENT [Goldberg 05] und SNOMED-CT [z.B. Smith 04, Schulz 05, Héja 08] bestätigen.

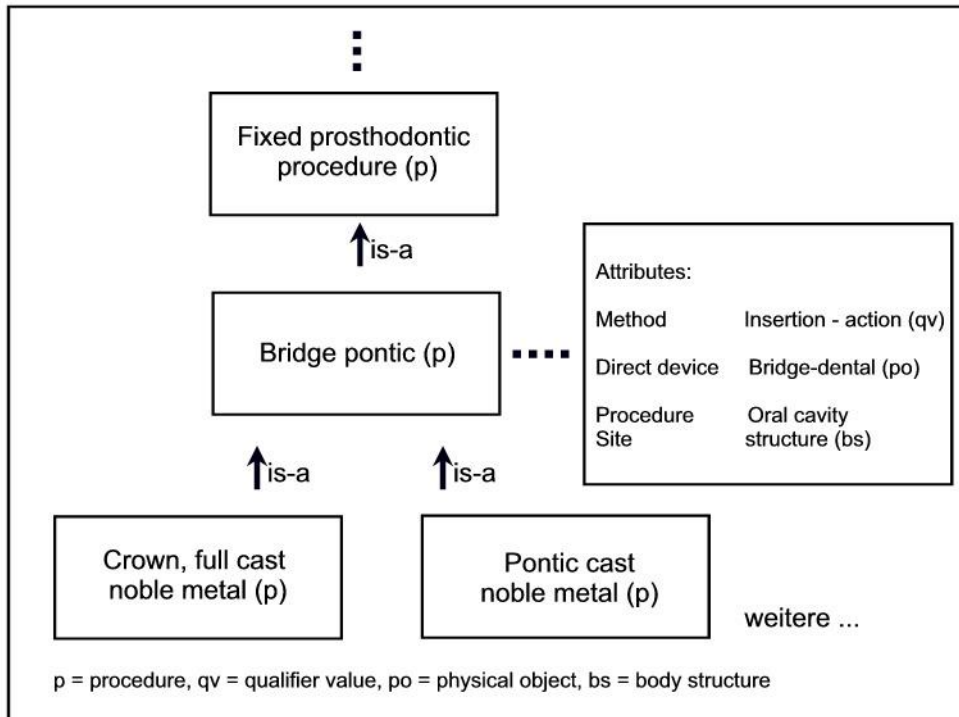


Abb.3 Ausschnitt aus der SNOMED_CT Procedure-Taxonomie

Die Problematik der semantischen und ontologischen Ungenauigkeiten haben unterschiedliche Ursachen. Einerseits haben sich die meisten Terminologien in Jahrzehnten entwickelt und waren ursprünglich nicht dazu bestimmt, durch den Computer genutzt zu werden. Viele kleine Ungenauigkeiten, die beim Computer zu Falschbewertungen führen, werden durch den erfahrenen menschlichen Auswerter im Kontext problemlos erkannt oder sogar nicht einmal bewußt erkannt, sondern im Prozeß des Auswertens implizit richtiggestellt. Zum anderen weist *Ingenerf* darauf hin, daß die Terminologien und kontrollierten Vokabulare unterschiedlichen Zwecken dienen: So dient ICD in der Epidemiologie statistischen Zwecken, MeSH der Indexierung von wissenschaftlichen Artikeln, beide nicht der Beschreibung der Realität im Sinne der Ontologie. Er rät daher, epistemologische (Was wissen wir?) von ontologischen (Was existiert in der Realität?) Ordnungssystemen zu unterscheiden und in der Behandlung zu differenzieren:

„As opposed to the terminological systems, the application of ontological principles to thesauri and statistical classification should be examined with greatest caution.“

Das UMLS (Unified Medical Language System) der US. National Library of Medicine [UMLS] faßt in seinem Methathesaurus[®] über hundert Thesauri, Terminologien und kontrollierte Vokabulare, darunter mit Ausnahme von GALEN alle oben erwähnten, begriffsorientiert zusammen. Die oben beschriebenen Schwächen (aus ontologischer Sicht) der Systeme werden durch das Zusammenlegen alleine natürlich nicht behoben. Mit Hilfe des „Semantic Network“, einem Ordnungssystem aus Kategorien (sog. „types“) und Relationen wird versucht, den zusammengefaßten Systemen eine ontologische Ordnung zu geben. Dies ist aber zur Zeit auch noch durch Unzulänglichkeiten gekennzeichnet [Kumar 04].

Zum Schluß dieses Abschnitts sei erwähnt, daß die in der Abschnittsüberschrift aufgeführten Benennungen für Ordnungssysteme trotz ihrer Beschreibung in DIN/CEN/ISO-Normen (z.B. DIN 2342: Begriffe der Terminologielehre) durchaus nicht immer einheitlich verwendet werden.

Ontologien in der Biomedizin

Bis heute wurden in der Biomedizin, insbesondere in der Grundlagenforschung, zahlreiche Ontologien entwickelt. Sie betreffen vor allem die Genforschung und die Anatomie / Physiologie / Entwicklung der in diesem Forschungsbereich am häufigsten genutzten Versuchstiere. Einen Überblick über die Entwicklung der Ontologien im biomedizinischen Bereich zeigen *Bodenreider* und *Stevens* [Bodenreider 06]. Zahlreiche dieser Ontologien sind in der OBO-Foundry [Smith 07] versammelt. Die OBO-Ontologien sind bestimmten Prinzipien verpflichtet, darunter unter anderem, daß sie offen zugänglich sein müssen. Das Prinzip, daß sie sich inhaltlich nicht überlappen (inhaltlich unabhängig sind), wird als Orthogonalität bezeichnet. Dies soll ihre freie Kombinierbarkeit gewährleisten. Die Ontologien können unter [OBO] in ihren jeweiligen Dateiformaten (OBO, OWL) heruntergeladen werden. Terme und ihre hierarchische Einordnung sind bei [OLS] einzusehen. Zu diesen Ontologien gehören auch die Gen-Ontologie (GO) und das Foundational Model of Anatomy (FMA), die kurz vorgestellt werden sollen.

Die *Gen-Ontologie* ist heute sicher die am meisten praktisch genutzte Ontologie. Das zeigt sich zum Beispiel in der Anzahl der Veröffentlichungen; von den oben erwähnten Zahlen aus PubMed beziehen sich ca. 2/3 auf die GO. Der Erfolg wird von *Bada* auf eine Reihe von Faktoren zurückgeführt:

„[...] the characteristics of GO that we believe are most responsible for its success: community involvement; clear goals; limited scope; simple, intuitive structure; continuous evolution; active curation; and early use.“ [Bada 04]

Mit Community involvement ist gemeint, daß die GO aus der Mitte der Genforschung heraus entwickelt wurde und nicht etwa als Problemlösung extern angeboten wurde. Darauf wird weiter unten noch mal eingegangen werden, ebenso auf den Faktor „begrenzter Umfang“.

Die GO besteht aus 3 Ontologien, auf deren Basis Daten gesammelt werden:

- Cellular component (Zellbestandteile)
- Biological process (z.B. physiologischer Prozeß, Signalübermittlung)
- Molecular function (z.B. katalytische Aktivität)

Im Zusammenspiel dieser Ontologien beschreibt die GO, wie sich Genprodukte im Zellkontext verhalten. Hierbei werden nur die normalen Funktionen, also nicht die in krankheitsbedingt veränderten Zellen, z.B. Tumorzellen, erfaßt. Die GO ist keine Datenbank von Gensequenzen, deren Entschlüsselung die Öffentlichkeit in jüngster Zeit beschäftigte [GO].

Das *Foundational Model of Anatomy* kann als eine Fortsetzung der Terminologia Anatomica unter Nutzung der Fortschritte der Computertechnologie angesehen werden. Das FMA ist aber mehr als das; es ist eine Ontologie, die is-a und part-of Relationen konsequent anwendet. Dabei beschreibt sie das gesamte Spektrum der Anatomie vom Mikro- zum Makrobereich. Cornelius Rosse, der das FMA mit Mitarbeitern entwickelte, beschreibt das FMA mit der Formel

$$\text{FMA} = (\text{AT}, \text{ASA}, \text{ATA}, \text{Mk}),$$

wobei AT (Anatomy Taxonomy) die Subsumptionsrelationen beinhaltet, ASA (Anatomical Structural Abstraction) die partitiven Relationen und ATA (Anatomical Transformation Abstraction) zeitabhängige anatomische Veränderungen (Entwicklung). Mk (Metaknowledge) bezeichnet die Regeln, nach denen verfahren wird. Das FMA beschreibt ausschließlich die kanonische Anatomie; krankheitsbedingte oder andere Abweichungen werden nicht erfaßt.

Auf der Website des FMA [FMA] kann die Ontologie eingesehen werden. Wie oben erwähnt, ist das FMA den OBO-Kriterien verpflichtet. Sie ist daher frei zugänglich. So kann man auch die gesamte Ontologie zur Nutzung auf dem eigenen PC downloaden. FMA wurde in Protégé entwickelt.

Die Grundlagen und Entwicklungsprinzipien des FMA werden ausführlich erläutert in [Rosse 03]. Grundlegende Arbeiten über Ontologien im anatomischen Bereich findet man in [Burger 08].

Ontologien in der Zahnheilkunde

Die Forderung nach der Entwicklung einer Ontologie in der Zahnheilkunde ist nicht neu. So beschrieben schon 2003 Sittig et al. In ihrem Artikel *Grand Challenges of Dental Informatics* eine der Herausforderungen:

„[...]To develop a knowledge-based ontology of dental concepts from which one could extract a standardized controlled clinical terminology to describe dental signs, symptoms, conditions, diseases, and treatments (i.e., procedures, methods, techniques, materials, and devices). Such an ontology forms the basis of the field of dental informatics.“[Sittig 03]

Walther fordert einen Konsensus über die Kriterien der Dokumentation und eine Ontologie als „backbone taxonomy“ (unter Hinweis auf einen Ausdruck von Smith), um in einer gemeinsamen Anstrengung (zahnärztliche) Behandlungsergebnisse besser werten zu können. [Walter 07]. Auch zur Verbreiterung der Datenbasis fallbasierter Entscheidungsunterstützungssysteme wird eine zahnmedizinische Ontologie für sinnvoll erachtet [Pauls 07].

Die bisherigen Entwicklungen von Ontologien im Bereich der Zahnheilkunde lassen sich leicht überblicken und sollen hier vorgestellt werden.

Seon Gyu Park et al. (College of Dentistry, Seoul National University, Korea) entwickelten eine Ontologie zur Beschreibung von Zahnpositionen. Ihre Arbeit

ist beschrieben in [Park 06, Park 07]. Die Autoren beschreiben die Notwendigkeit, die Position eines Zahnes im Zahnbogen zu beschreiben, da jedem Zahn auf Grund seiner Position eine unterschiedliche Funktion bzw. Rolle zukommt. Die Ontologie verwirklicht diese Anforderung durch Einführung mehrerer has-position Attribute, die sich auf die Rechts/Links-, OK/UK- und Front/Seitenzahn -Eigenschaften beziehen. Es ist ein einfaches Modell, das als Basis zur Unterstützung von Entscheidungen in der Planung festen Zahnersatzes dient. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Umsetzung der Ontologie in eine Sprache (OWL) und in der Beschreibung der Begrenzungen, die die Syntax den Umsetzungen der Ideen entgegensetzt.

Es handelt sich hier um eine Task-Ontologie im weiter oben beschriebenen Sinne, zumal die Ontologie unmittelbar mit einem Regelsystem zur Entscheidungsunterstützung verknüpft ist. Ein Bezug zu einer allgemein zahnärztlichen Ontologie oder einer Top-Level-Ontologie ist nicht erkennbar und wohl auch nicht gewollt. Es ist aber ein erster Schritt, genuin zahnärztliche Anforderungen in einer Ontologie zu beschreiben. Eine qualitative, topologische Beschreibung der Zahnbeziehungen untereinander und ihrer Veränderungen (z:B durch Aufwanderung, kieferorthopädische Behandlung oder Fehlentwicklungen) in Form einer Ontologie ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die ihrer Lösung noch harrt. Grundlagen und Schwierigkeiten zu diesem Thema vermitteln Bittner und Goldberg⁹ in [Bittner 07] am Beispiel des Kiefergelenks.

Marie *Gustavsson* (Chalmers Universität Göteborg) beschreibt in [Gustavsson 05] die Datenerfassung auf Basis einer OWL-Ontologie für den Bereich der Oralen Medizin. Das Programm MedView dient der Erfassung von Patientendaten, die, etwa mit Schleimhautläsionen, in entsprechende Einrichtungen überwiesen werden. MedView [MEDVIEW] sammelt nicht nur Daten, sondern ermöglicht auch statistische Auswertungen und dient zum Aufbau einer Bilddatenbank. Die Datenbank ist zudem Grundlage der Schulungssoftware mEduweb, die der Studentenausbildung im Bereich der Oralen Medizin dient. Bei dieser Ontologie handelt es sich wiederum um eine typische Task-Ontologie; übergreifende ontologische Gesichtspunkte werden nicht berücksichtigt. Die Autorin ist als Informatikerin im Wesentlichen an der technischen Umsetzung der Datenbankanforderungen interessiert.

Miguel H. *Torre-Urquidy* (Center for Dental Informatics, University of Pittsburgh) et al. untersuchen in [Torres 09] ,inwieweit sich Modellierungsprinzipien für Daten (hier zahnmedizinisch anamnestische Daten), basierend auf einem grundlegenden Artikel von A. Rector [Rector 01], auswirken, wenn Versuchspersonen (Zahnärzte) anamnestische Feststellungen aus Krankenblatteinträgen solchen aus Anamnesefragebögen zuordnen sollten (mapping), falls eine inhaltliche Äquivalenz besteht. Ziel war es zu untersuchen, ob bei Daten, die Modellierungsprinzipien gehorchen, eine höhere Übereinstimmung zu erzielen ist (gemessen mit Cohens Kappa).

Hintergrund dieser Fragestellung ist, daß das Center for Dental Informatics an einer Terminologie / Ontologie für die zahnärztliche Diagnostik arbeitet (Dental

⁹ Prof. Louis J. Goldberg ist einer der wenigen Zahnärzte, die in der ontologischen Grundlagenforschung tätig sind.

diagnostic and findings vocabulary project). Das Projekt ist nach *Torres-Urquidy* noch in einem frühen Stadium, es gibt keine Veröffentlichungen. Aus einem Vortrag des Autors (Powerpoint, [Torres 09/2]) ist ersichtlich, daß die Ontologie in Protégé entwickelt wird und sich an DOLCE als Top-Level-Ontologie anlehnt. Eine solche Ontologie könnte ein Baustein einer zahnmedizinischen Top-Domain-Ontologie werden, da die Diagnostik für alle zahnmedizinischen Bereiche grundlegend ist.

Diese Übersicht über zahnmedizinische Ontologie-Projekte zeigt, daß die Entwicklung von Ontologien in diesem Bereich noch in den Kinderschuhen steckt. Einerseits nutzt die Zahnheilkunde bereits vorhandene Ontologien, insbesondere die Forschung in der Parodontologie die GO (Beispiel:[Demmert 08]) und anerkennt damit de facto deren Nutzen. Andererseits halten sich Anstrengungen zur ontologisch fundierten Modellierung der genuin zahnmedizinischen Kernbereiche in Grenzen.

Herausforderungen für die Zahnheilkunde

Es stellt sich daher die Frage, was die Zahnheilkunde tun kann, um sich die Vorteile ontologischer Fundierung und expliziter Formalisierung der Wissensbasen nutzbar zu machen; Vorteile, die nochmals kurz aufgezählt werden sollen:

- Konsequente Strukturierung des Wissens
- Vermeidung semantischer Ambiguität
- Computergestützte Überprüfung der Wissensbasen auf innere Widersprüche
- Computergestützte Auswertung der Daten nicht nur im quantitativen Sinne, sondern auch qualitativ durch entsprechende Inferenzverfahren
- Globaler Verfügbarkeit ontologischen Struktur im Internet
- Globaler Datenaustausch durch kompatible Datenstruktur und –semantik

Zum letzteren Punkt sollte erwähnt werden, daß natürlich nicht erwartet werden kann, daß die bestehenden Computersysteme in Praxen und Kliniken ihre unterschiedlichen Datenstrukturen anpassen, sobald eine entsprechende Ontologie vorläge. Immerhin könnten neue Systeme die Ontologie als Basis wählen, für vorhandene Systeme könnte die Ontologie als Interlingua den Aufwand für Übersetzungen zwischen Systemen erheblich reduzieren.

Über Methodiken, wie Ontologien zu entwickeln sind, haben zahlreiche Forscher veröffentlicht. Eine systematische Übersicht aus der Sicht der Informatik bietet M. *Fernández López* [Fernández 99]. In einer Befragung von Ontologie-Entwicklern durch *Cardoso* äußerten allerdings 60%, gar keine

besondere Methodik anzuwenden [Cardoso 07]. Das Beispiel vorhandener Ontologien, beispielsweise der GO, zeigt aber, daß durch zunächst fehlende oder unzureichende Planung Korrekturen erforderlich wurden. Daher erscheint es für die Zahnheilkunde als sinnvoll, von der Lernkurve früher Ontologien zu profitieren und Entwicklungsmethodiken zu nutzen.

In Anlehnung an [Spear 06] läßt sich der Designprozeß folgendermaßen umfassen:

- Explizite Bestimmung der Domaine (Grenzen, Granularität, Perspektive, Zweck), das beinhaltet auch die Beantwortung der Frage, welche formalen Kategorien und Relationen geeignet bzw. erforderlich sind (Wahl der Top-Level Ontologie).
- Sammeln von Informationen: Auflisten der Terme, die voraussichtlich aufgenommen werden sollen. Hier können bestehende Terminologien genutzt werden. Aber auch die Durchforstung von Wissenschaftlichen Artikeln oder Krankenblättern, die teilweise computergestützt erfolgen kann [z.B. SmithJ 04] ist hilfreich. Außerdem: Welche bereits bestehenden Ontologien können genutzt werden?
- Ordnen der Terme durch Relationen in Anlehnung an die wissenschaftlichen Theorien der Domaine und Erproben durch Variationen und Gedankenexperimente.
- Überprüfen der logischen, philosophischen und wissenschaftlichen Kohärenz des erarbeiteten Modells. Hierfür wurden Verfahren entwickelt, z.B. die OntoClean-methode von *Guarino* und *Welty* [Guarino 04].
- Überprüfung der Kompatibilität mit anderen relevanten (bzw. genutzten) Ontologien
- Überprüfung der Verständlichkeit durch den (menschlichen) Nutzer
- Formalisierung in einem maschinenlesbaren Format.

Ähnlich wie bei der Softwareentwicklung muß dieser Designprozeß als iterativer Prozeß verstanden werden, der allmählich zu einer Verfeinerung der Ontologie führt. Dies ist auch deshalb erforderlich, weil die Ontologie dem Stand der Wissenschaft angepaßt werden muß.

Zum ersten Punkt ist zu bemerken, daß die Bestimmung der Domaine ein entscheidender Punkt für den Erfolg ist. Niemand kann erwarten, daß es möglich wäre, eine Ontologie der gesamten Zahnheilkunde „from scratch“ zu entwickeln; vielmehr erscheint es notwendig, zunächst die Modellierung kleinerer Bereiche zu verwirklichen (siehe GO). Geschieht dies unter Bezug auf eine gemeinsame Top-Level-Ontologie und werden die Grenzen der Ontologien untereinander beachtet (Orthogonality), bleibt eine gemeinsame Nutzung möglich. Ein Beispiel für begrenzte Ontologien wären eine Ontologie des Zahnschemas oder eine Ontologie der prothetischen Behandlungsmittel.

Ebenfalls – mit Blick auf die erfolgreiche GO - wäre es wichtig, daß die Ontologieentwicklung aus der Profession selbst heraus erfolgt. Es sind wir Zahnärzte, die die grundlegenden Strukturen (Kategorien, Relationen) der Ontologie bestimmen müssen, da nur wir diese aus unserer wissenschaftlichen *und* praktischen Erfahrung heraus beurteilen können. Die Entwicklung von Ontologien in der Zahnheilkunde muß durch Zahnärzte erfolgen und kann nicht Informatikern überlassen bleiben. Wenn wir diese Herausforderung nicht annehmen, werden wir entweder keine Ontologien haben oder solche, die die Wirklichkeit unseres Tuns nicht angemessen abbilden und damit nutzlos sind.

Zahnmedizinische Wirklichkeit gibt es überall auf der Welt, daher ist es einsichtig, daß die Entwicklung von Ontologien der Zahnheilkunde ein globales Unternehmen sein muß. Das Internet bietet die Möglichkeit einer weltweiten Diskussion und Zusammenarbeit. Ontologieentwicklung muß ein offener Gruppenprozeß sein, da nur so Akzeptanz erreicht werden kann.

Ausblick

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über Ontologien im biomedizinischen Bereich. Bezüge zur Zahnheilkunde konnten nur wenige aufgezeigt werden, da es bisher nur wenige gibt. Daher ist es ein Hauptanliegen, Interesse für ein Projekt zahnmedizinischer Ontologien zu wecken. Zahnärzte, die an dem Projekt mitarbeiten wollen, müssen keine Logiker, Informatiker und Philosophen sein; aber ein Grundinteresse an philosophischen Fragen, Computerkenntnisse (zumindest in Hinblick auf den Computer als Kommunikationsmedium) und Grundkenntnisse der Logik, insbesondere der Prädikatenlogik sind hilfreich, um die zahlreichen Veröffentlichungen zum Thema lesen zu können. Englisch ist unverzichtbar. Die eigene Erfahrung zeigt, daß sich diese „skills“ bei der Beschäftigung mit dem Thema mehr oder weniger von selber einstellen bzw. verbessern.

Die Ontologieentwicklung für die Zahnheilkunde ist ein Langzeitprojekt. Schnelle Ergebnisse sind nicht zu erwarten, abgeschlossen wird der Prozeß nie sein. Es wäre daher wünschenswert, wenn die Ontologieentwicklung auf Dauer in den normalen zahnmedizinischen Wissenschaftsbetrieb eingegliedert würde [vergl. Smith 08].

Ahaus 2008

Literatur

Viele der hier aufgeführten Publikationen, insbesondere Kongreßbeiträge, sind im Internet verfügbar, auch wenn keine Webadresse aufgeführt ist.

- ADA 09 ADA Center for Evidence-Based Dentistry <http://ebd.ada.org/> zuletzt aufgerufen 10.5.09
- Bada 04 Bada M et al. **A Short Story on the Success of the Gene Ontology** Journal of Web Semantics, Vol.1, No.2 2004
- Berners-Lee 01 Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O, **The Semantic Web** Scientific American Magazine, New York 5/2001
- BFO **Basic Formal Ontology** (IFOMIS) <http://www.ifomis.org/bfo/home/> zuletzt aufgerufen 22.5.09
- BIOTOP **BioTop A Top-Domain Ontology for the Life Science** IMBI Universität Freiburg, <http://www.imbi.uni-freiburg.de/biotop/>
- Bittner 07 Bittner T, Goldberg LJ, **The qualitative and time-dependent character of spatial relations in biomedical ontologies**, Bioinformatics Vol. 23 No 13 2007 Oxford University Press
- Bodenreider 06 Bodenreider O, Stevens R. **Bio-Ontologies: Current Trends and Future Directions** Briefings in Bioinformatics 2006;7(3),256-74
- Burger 08 Burger A, Davidson D, Baldock R (ed.), **Anatomy Ontologies for Bioinformatics**, Springer Science+Business Media 2008
- Cardoso 07 Cardoso J, **The Semantic Web Vision: Where are We?** IEEE Conference Proceedings Intelligent Systems 2007 IEEE Press 2007
- Casati 98 Casati, R, Smith, B, Varzi, A, **Ontological Tools for Geographic Representation**, in Guarino, N (ed.), *Formal Ontology in Information Systems*, Amsterdam: IOS Press, 1998, pp. 77–85
- CEBD 09 **Centre for Evidence-Based Dentistry** <http://www.cebd.org/> zuletzt aufgerufen 10.5.09
- Ceusters 06 Ceusters W, Elkin P, Smith B, **Referent Tracking: The Problem of Negative Findings** Stud Health Technol Inform 2006;124:741-6
- Cimino 98 Cimino JJ, **Desiderata for controlled medical vocabularies in the twenty-first century** Methods Inf Med, Schattauer, Stuttgart 1998 35,273-84
- Cimino 06 Cimino JJ, **In Defense of the Desiderata** J Biomed Inform 2006; 39(3) 299-306
- Cocchiarella 07 Cocchiarella NB, **Formal Ontology and Conceptual Realism**, Springer Berlin Heidelberg 2007
- Demmert 08 Demmert RT, et al. **Transcriptomes in healthy and diseased gingival tissues**, J Periodontol. 2008 Nov;79(11):2112-24.
- Dietze 03 Dietze S, Kerschbaum T, Teeuwen R. **Langzeitschicksal von Restgebiss und 1474 klammerverankerten Modellguss-Prothesen in einer zahnärztlichen Praxis** Dtsch Zahnärztl Z. 2003 Sep;58(9):508-11

- DOLCE **Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering (DOLCE)**
<http://www.loa-cnr.it/DOLCE.html> zuletzt aufgerufen 23.5.09
- EBM 09 **Deutsches Netzwerk Evidenzbasierte Medizin e.V. Fachbereich Zahnmedizin**
http://www.ebm-netzwerk.de/fachbereiche/fb_zahnmedizin.htm
 zuletzt aufgerufen 10.5.09
- EIDOS **eidos Centre in Metaphysics** Université de Genève
<http://www.philosophie.ch/eidos/> zuletzt aufgerufen 22.5.09
- Fernandez 99 Fernandez-Lopez M, **Overview of Methodologies for Building Ontologies**
 Proceedings of the IJCAI-99 Workshop, Morgan Kaufmann Publishers 1999
- FMA **Foundational Model of Anatomy**
<http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/index.html>
- GALEN **openGalen** <http://www.opengalen.org/> zuletzt aufgerufen 16.5.09
- GFO **General Formal Ontology (GFO)** <http://www.onto-med.de/ontologies/gfo/index.jsp> zuletzt aufgerufen 23.5.09
- GO **An Introduction to the Gene Ontology**
<http://www.geneontology.org/GO.doc.shtml>
- Goldberg 05 Goldberg LJ, Ceusters W, Eisner J, Smith B, **The Significance of SNODENT** in Engelbrecht R (ed.) *Connecting Medical Informatics and Bioinformatics* MIE2005, IOS Press, Amsterdam 2005
- Graunt 76 Graunt J, **Natural and Polotical Observations upon the Bills of Mortality**, London 1676
- Gruber 93 Gruber TR **A Translation Approach to Portable Ontology Specifications**
Knowledge Acquisition, 5(2):199-220, Academic press (Elsevier) 1993
- Guarino 95 Guarino, N.; Giarretta, P. **Ontologies and Knowledge Bases: Towards a Terminological Clarification.** In: N. Mars, ed. *Towards Very Large Knowledge Bases: Knowledge Building and Knowledge Sharing.* IOS Press, Amsterdam 1995
- Guarino 04 Guarino N, Welty CA, **An Overview of OntoClean** in Staab S, Studer R (ed.) *Handbook on Ontologies* Springer Berlin Heidelberg, p 151
- Gustavsson 05 Gustavsson M, Falkman G **Representing Clinical Knowledge in Oral Medicine Using Ontologies**, in Engelbrecht R, Geissbühler A, Lovis C, (ed.) *Connecting Medical Informatics And Bio-informatics: Proceedings of MIE2005 (Studies in Health Technology and Informatics)* IOS Press Amsterdam 2005
- Héja 06 Héja G, Surján G, Varga P, **Ontological Analysis of SNOMED CT**, *Medical Informatics and Decision Making* 2008, 8(Suppl 1) BioMed Central
<http://www.biomedcentral.com>
- Horridge 04 Horridge M, Knublauch H, Rector A, Stevens R, Wroe C, **A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using The Protégé-OWL Plugin and CO-ODE Tools**, The University of Manchester 2004 <http://www.co-ode.org/resources/tutorials/ProtegeOWLTutorial.pdf>
- Husserl 80/1 Husserl E, **Logische Untersuchungen Bd I Prolegomena zur reinen Logik**, Nachdruck der 2. Auflage 1913, MaxNiemeyerVerlag Tübingen 1980
- Husserl 80/2 Husserl E, **Logische Untersuchungen Bd II/1 Untersuchungen zur Phänomenologie und Theorie der Erkenntnis**, Nachdruck der 2. Auflage 1913, MaxNiemeyerVerlag Tübingen 1980

- ICD10 **ICD-10** <http://www.dimdi.de/static/de/klassi/diagnosen/icd10/> zuletzt aufgerufen 16.5.09
- IFOMIS **Institute for Formal Ontology and Medical Information Science** Universität des Saarlandes, <http://www.ifomis.org/> zuletzt aufgerufen 22.5.09
- IHTSDO 07 **Activity report 2007 IHTSDO**
http://www.ihtsdo.org/fileadmin/user_upload/Docs_01/IHTSDO_AnnualReport_2007_low.pdf zuletzt aufgerufen 15.5.09
- Ingenerf 06 Ingenerf J, LinderR, **Ontological Principles Applied to Biomedical Vocabularies** in :Foundations of Clinical Terminologies and Classification (FTCT) 2006 http://www.imbi.uni-freiburg.de/medinf/fctc-2006/docs/in_final.pdf zuletzt aufgerufen 18.5.09
- Jansen 08 Jansen L, **Kategorien: Die top level Ontologie** in Jansen L, Smith B (ed.) Biomedizinische Ontologie Wissen strukturieren für den Informatik-Einsatz, vdf Hochschulverlag Zürich 2008
- Johnson 21 Johnson WE, **Logic** , Part I.Cambridge University Press,Cambridge 1921
- Karenberg 06 Karenberg A, **Fachsprache Medizin im Schnellkurs**, Schattauer Stuttgart 2006
- Kumar 04 Kumar A, Schulze-Kremer S, Smith B, **Revising the UMLS Semantic Network** in Fieschi M et al. (ed.) Medinfo 2004 IOS Press, Amsterdam, 2004
- LAO **Laboratory for Applied Ontology** Institute of Cognitive Science and Technology, Trento <http://www.loa-cnr.it/index.html>
- Loux 06 Loux MJ, **Metaphysics. A Contemporary Introduction**, 3rd ed.Routledge New York 2006
- Masolo 03 Masolo C, Borgo S, Guarino N, Oltramari A, **WonderWeb Deliverable D18**
<http://www.loa-cnr.it/Papers/D18.pdf> zuletzt aufgerufen 23.5.09
- MEDVIEW <http://www.cs.chalmers.se/proj/medview/website/medview/>
- McCarthy 69 McCarthy,J und Hayes,PJ **Some Philosophical Problems from the standpoint of Artificial Intelligence** Machine Intelligence 4, 1969
- McCarthy 84 McCarthy,J **Some expert System need common sense** in Pagels,H (ed.) Computer Culture: The Scientific, Intellectual and Social Impact of the Computer, Anals of the New York Academy of Science, Vol. 426
- MeSH **Medical Subject Headings** <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh?itool=sidebar>
 Zuletzt aufgerufen 15.5.09
- Mittelstraß 95 Mittelstraß,J (ed.) **Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie**, Stichwort Ontologie, Stichwort Universalien, J.B.Metzler Stuttgart 1995
- NCBO **The National Center for Biomedical Ontologies**
<http://bioontology.org/index.html> zuletzt aufgerufen 19.5.09
- OBO **The Open Biomedical Ontologies** <http://www.obofoundry.org/> , zuletzt aufgerufen 25.5.09
- OLS **Ontology Lookup Service** <http://www.ebi.ac.uk/ontology-lookup/> zuletzt aufgerufen 25.5.09
- ONTOMED **OntoMed Research Group** Universität Leipzig <http://www.onto-med.de/index.jsp> zuletzt aufgerufen 20.5.09

- Park 06 Park SG, Kim, H, **Dental Decision Making on Missing Tooth Represented in an Ontology and Rules**, in Mizoguchi R ,Giunchiglia F, Shi Z, (ed.) The Semantic Web-ASWC 2006 pp. 322-28,2006 Springer Berlin 2006
- Park 07 Park SG, Kim H, Kim M **Tooth Positional Ontology Represented in OWL** , in Kuhn KA,Warren JR,LeongT,(ed,) Medinfo Proceedings of the 12th World Congress on Health (Medical) Informatics , IOS Press, Amsterdam 2007
- Pauls 07 Pauls U, Kus M, Walther W, **Zahnärztliche Therapiefindung mit einem Entscheidungsunterstützungssystem** Dtsch Zahnarztl Z 62 2007 6 399-401
- Rector 01 Rector AL, **The Interface between Information, Terminology, and Inference Models** , 2001 IMIA IOS Press, Amsterdam 2001
- Poli 01 Poli, R. **ALWIS. Ontology for Knowledge Engineers**. PhD Thesis, Utrecht.
- Pro 09 **Protégé** <http://protege.stanford.edu> zuletzt aufgerufen 9.5.09
- RDF Manola F,Miller E (ed.) **RDF Primer** <http://www.w3.org/TR/REC-rdf-syntax/> zuletzt aufgerufen 10.5.09
- RO **OBO Relation Ontology** <http://www.obofoundry.org/ro/> zuletzt aufgerufen 20.5.09
- Rosse 03 Rosse C, Mejino J, **A reference Ontology for Bioinformatics: The Foundational Model of Anatomy**, Journal of Bioinformatics, 36 , 2003, 478-500
- Schulz 05 Schulz S, Hahn U, Rogers J,**Semantic Clarification of theRepresentation of Procedures and Diseases in SNOMED_CT[®]** in Engelbrecht R et al.(ed.) Connecting Medical Informatics and Bioinformatics MIE2005, IOS Press, Amsterdam 2005
- Schulz 07 Schulz S, Stenzhorn H, **Ten Theses on Clinical Ontologies** international council on medical and care computenetics (ICMCC) Amsterdam 2007 Tagungsband
- Sittig 03 Sittig DF, Kirshner M, Maupomé G **Grand Challenges in Dental Informatics** Adv Dent Res 17: 16-19, 2003
- Smith 04 Smith B, **Ontologiebasierte Qualitätssicherung medizinischer Terminologien** in: 49. Jahrestagung der gmms, German Medical Science ,2004 <http://www.egms.de/en/meetings/gmms2004/04gmms068.shtml> zuletzt aufgerufen 19.5.09
- Smith 05/1 Smith B et al. **Relations in biomedical ontologies** , Genome Biology, 2005/6
- Smith 05/2 Smith,B. **Beyond Concepts: Ontology as Reality Representation** in Varzi,A, Vieu, L (ed.) Proceedings of FOIS 2004, Amsterdam IOS Press 2005
- Smith 06 Smith B, Kusnierczyk W, Schober D, Ceusters W **Towards a Reference Terminology for Ontology Research and Development in the Biomedical Domain in** Bodenreider O, (ed.) KR_MED 2006 Proceedings <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/Publications/CEUR-WS/Vol-222/> zuletzt aufgerufen 16.5.09
- Smith 06/2 Smith B, **From Concepts to Clinical Reality:An Essay on the Benchmarking of Biomedical Terminologies** J Biomed Inform 2006; 39(3) 288-98
- Smith 07 Smith,B et al. **The OBO Foundry: coordinated evolution of ontologies to support biomedical data integration** Nature Biotechnology 25, 1251-1255,2007

- Smith 08 Smith B, **New Desiderata for Biomedical Terminologies** in Munn K, Smith B,(ed.) Applied Ontology An Introduction, Ontos Frankfurt 2008
- Smith 08/2 Smith B, **Ontology:Science** Formal Ontology in Information systems (FOIS) 2008, IOS Press, Amsterdam, 2008
- SmithJ 04 Smith J, Wilbur WJ, **Retrieving Definitional Content for Ontology Development** ,Comput Biol Chem 28(2004) 387-91
- SNOMED **SNOMED-CT** <http://www.ihtsdo.org/snomed-ct/> zuletzt aufgerufen 22.5.09
- Sowa 00 Sowa JF, **Knowledge Representation: Logical, Philosophical and Computational Foundations**, Brooks Cole Publishing Co, Pacific grove CA, 2000
- Spear 06 Spear A **Ontology for the Twenty First Century: An Introduction with Recommendations** (Work in progress) <http://www.ifomis.org/bfo/manual.pdf> zuletzt aufgerufen 1.6.09
- Torres 06 Torres-Urquidy MH, **Evaluation of the Systematized Nomenclature of Dentistry(SNODENT)** AMIA Annual Symposion Proceedings 2006
- Torres 09 Torres-Urquidy MH, Acharya A, Hernandes.Cott P, Misner J, Schleyer T **Evaluating the Effectivness of Modeling Principles for Data Models** ITCH 2009 Conference, IOS Press, Amsterdam
- Torres 09/2 Torres-urquidy MH, Schleyer T, **Formal Concepualization of Dental Diagnoses: Status Report**, gehalten auf der InterOntology 09, Tokyo, <http://abelard.flet.keio.ac.jp/ontology/index.php?InterOntology09> zuletzt aufgerufen 29.5.09
- UMLS Unified Medical Language System <http://www.nlm.nih.gov/research/umls/> zuletzt aufgerufen 23,5,09
- Walther 00 Walther W, Micheelis W,(ed.) **Evidence-Based Dentistry** Deutscher Ärzte Verlag Köln 2000
- Walther 07 Walther W, **On Diverse Approaches to Prosthodontic Research: The Case Series Approach to Clinical Research** Int J Prosthodont 2 0,4, 2007 374-75
- Whitmore 98 Whitmore J,(ed.)**Terminologia Anatomica. International Anatomical Terminology** Thieme Stuttgart 1998
- W3C 09 W3C Semantic Web: **Web Ontology Language(OWL)** <http://www.w3.org/2004/OWL/> zuletzt aufgerufen 9.5.09
- XML08 Bray,T, Paoli,J,(ed.) **Extensible Markup Language (XML) 1.0** <http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/> zuletzt aufgerufen 15.5.09
- Zelewski 05 Zelewski ,S, **Einführung in das Themenfeld „Ontologien“ aus informations- und betriebswirtschaftlicher Perspektive** in Zelewski, S.; Alparslan, A.; Ontologiebasierte Kompetenzmanagementsysteme – Grundlagen, Konzepte, Anwendungen, Logos Berlin 2005